



TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Konetekniikan osasto

Teemu Manderbacka

**Aallokon aiheuttaman värähtelyherätteen arviointi laivan
mallikoemittausten perusteella**

Diplomi-insinöörin tutkintoa varten tarkastettavaksi jätetty diplomityö
Helsinki 3.5.2007

Työn valvoja: Professori Jerzy Matusiak

Työn ohjaajat: Diplomi-insinööri Satu Hänninen

Diplomi-insinööri Karno Tenovuo

| | | | |
|--|---|-----------|--------------------|
| Tekijä | Teemu Manderbacka | | |
| Työn nimi | Aallokon aiheuttaman värähtelyherätteen arviointi laivan mallikoemittauksen perusteella | | |
| Päivämäärä | 3.5.2007 | Sivumäärä | 84 + liitteet (34) |
| Osasto | Konetekniikan osasto | | |
| Professori | Kul-24 Laivanrakennusoppi | | |
| Valvoja | Professori Jerzy Matusiak | | |
| Ohjaajat | Diplomi-insinööri Satu Hänninen, Diplomi-insinööri Karno Tenovuo | | |
| <p>Tutkimuksessa on arvioitu aaltojen aiheuttamaa springing-herätettä mallikokeiden tulosten perusteella. Mallikokeissa on keulan alueelta mitattu paine useista pisteistä samanaikaisesti suurella taajuudella. Mallikoemittauksissa on ajettu mallia epäsäännöllisessä aallokossa eri aallonkorkeuden ja kohtaamiskulman yhdistelmillä. Springing-herätevoimaa ei ole aikaisemmin arvioitu mittaamalla suoraan painetta useista pisteistä mallin kyljellä. Tutkimuksessa arvioidaan herätteen suuruutta, vaikutuskohtaa sekä herätteen luonnetta.</p> <p>Mitatuista painesignaaleista on interpoloitu paine rungon pinnalle paineantureiden välille. Paine on integroitu kaaren pinnan yli viivakuormaksi. Viivakuorman tarkastelu on suoritettu taajuustasossa. Herätevoimaa on tarkasteltu tietyllä taajuusalueella, josta on eliminoitu ensimmäisen kertaluokan kuormitus.</p> <p>Mallin ja aallokon kohtaamiskulmalla todettiin olevan vaikutusta herätevoiman suuruuteen aalloille altistuneen kyljen puolella. Sivuvastaisessa aallokossa herätevoimat olivat suurempia kuin vasta-aallokossa. Suurimmat herätevoimat vaikuttivat konstruktiovesiviivan olkapään etupuolella. Kaarikulmalla todettiin olevan myös vaikutusta voimien suuruuteen. Tämän tutkimuksen perusteella loivempi kaarikulma konstruktiovesiviivan korkeudella aiheuttaisi suuremman herätteen. Herätevoiman todettiin koostuvan jaksoittain toistuvista pienistä iskumaisista kuormista, jotka vaikuttavat konstruktiovesiviivan läheisyydessä. Todettiin tarvetta säännöllisen aallokon kokeille eri runkomuodoilla, jotka mahdollistaisivat tarkemman arvion kaarikulman vaikutuksesta herätevoimaan. Iskumaisten kuormien mallien vertailu säännöllisen aallokon mittauksiin voisi myös auttaa ymmärtämään ilmiötä paremmin.</p> | | | |

| | | | |
|---|--|-----------------|----------------|
| Author | Teemu Manderbacka | | |
| Title of the thesis | Estimation of wave-induced vibration excitation based on ship model measurements | | |
| Date | 3.5.2007 | Number of pages | 84 + app. (34) |
| Department | Mechanical Engineering | | |
| Professorship | Kul-24 Naval Architecture | | |
| Supervisor | Professor Jerzy Matusiak | | |
| Instructors | Satu Hänninen, M.Sc. (Tech), Karno Tenovuo, M.Sc. (Tech) | | |
| <p>In this study wave-induced springing excitation has been estimated using results obtained from model experiments. In the experiments pressure was measured simultaneously at multiple points on the bow area of the ship model. Model has been driven in irregular waves. Various significant wave height and encounter angle combinations have been used. Springing excitation force has not been measured this way before. In this study the magnitude, location on hull where force is acting and the nature of the excitation force are estimated.</p> <p>Pressure over the area between transducers has been interpolated using measured pressure values. Pressure was then integrated over each cross section of hull in order to obtain force distribution over the length of the measuring area. Force distribution is transformed into frequency domain. First order excitations are eliminated in the frequency domain.</p> <p>Encounter angle had a great influence on the magnitude of excitation force on the side of the hull exposed to waves. Head to beam waves gave larger excitation forces than head waves. Largest excitation forces were measured right in front of the shoulder of construction water line. Side steepness was found out to affect on the magnitude of excitation forces. According to this study, larger flare at the construction water line caused larger forces. Excitation force was found out to consist of small periodic forces acting near to construction water line. Experiments conducted in monochromatic waves using different hull shapes could give better insight on the affect of side steepness.</p> | | | |

Esipuhe

Tämä opinnäytetyö on tehty Teknillisen Korkeakoulun laivalaboratoriossa. Työ on tehty osana TEKES:in ja Aker Yards:in rahoittamaa ”Laivan springing-ilmion herätteet”-projektia. Kiitän laivalaboratoriota saamastani tuesta sekä mukavasta työympäristöstä.

Haluan kiittää työn valvojaa professori Jerzy Matusiakia arvokkaista neuvoista ja asiantuntija-avusta. Kiitokset DI Satu Hänniselle ja DI Karno Tenovuolle ohjauksesta ja kommentteista sekä mielenkiinnosta työtäni kohtaan, kiitokset heille myös työn kielellisen asun tarkastamisesta. Kiitokset laivalaboratorion DI Pekka Ruposelle ja DI Tommi Mikkolalle hyvistä neuvoista.

Lisäksi haluan kiittää vanhempiani ja ystäviäni tuesta ja kannustuksesta sekä työn että opiskeluni aikana. Opiskeluaika TKK:lla on ollut erittäin antoisaa. Erityisesti korkeakoulun suomat mahdollisuudet kansainväliseen vaihtoon ja harjoitteluun ovat tarjonneet paljon arvokkaita kokemuksia, antaneet kielitaitoa, mahdollistaneet toteuttaa omia unelmia ja erityisesti opettaneet elämää.

Helsingissä 3.5.2007

Teemu Manderbacka

Sisällysluettelo

| | |
|--|-----------|
| <i>Esipuhe</i> | <i>i</i> |
| <i>Sisällysluettelo</i> | <i>ii</i> |
| <i>Symboliluettelo</i> | <i>iv</i> |
| 1 Johdanto | 1 |
| 1.1 Työn tausta | 1 |
| 1.2 Tavoitteet | 2 |
| 1.3 Työn sisältö | 3 |
| 2 Rungon värähtelyt ja aallokko | 4 |
| 2.1 Laivapalkki | 4 |
| 2.1.1 Poikkileikkauksen ominaisuudet | 5 |
| 2.1.2 Viivakuorma..... | 7 |
| 2.1.3 Laivapalkin värähtelyt, ominaismuodot | 7 |
| 2.1.4 Vaste herätteeseen | 8 |
| 2.2 Aallokko | 14 |
| 2.2.1 Säännöllinen aallokko | 14 |
| 2.2.2 Kohtaamiskulman muutoksen vaikutus kohtaamistaajuuteen. | 17 |
| 2.2.3 Epäsäännöllinen aallokko..... | 18 |
| 2.2.4 Laivan kohtaama aaltospektri..... | 21 |
| 2.2.5 Epäsäännöllisen aallokon jyrkkyyden spektri | 23 |
| 3 Mallikokeet | 25 |
| 3.1 Mallin tiedot ja antureiden sijainnit | 25 |
| 3.2 Tehdyt mittaukset | 27 |
| 4 Paineen aiheuttaman voiman laskenta | 28 |
| 4.1 Paineen interpolointi | 28 |
| 4.1.1 Esimerkki interpoloinnista kaarelle | 30 |
| 4.1.2 Paineen interpoloinnin ongelmat | 32 |
| 4.2 Paineen integrointi voimaksi | 34 |
| 4.2.1 Projisoidun alan laskenta..... | 35 |
| 4.2.2 Voiman laskentamenetelmän verifiointi..... | 37 |
| 5 Analysointimenetelmät | 39 |
| 5.1 Muunnos taajuustasoon | 39 |
| 5.1.1 Mitatun signaalin muuntaminen taajuustasoon | 40 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 5.1.2 | Tehospektri..... | 42 |
| 5.1.3 | Ikkunointi | 43 |
| 5.2 | Signaalin suodattaminen..... | 46 |
| 6 | <i>Mittaustulosten esittäminen</i> | 48 |
| 6.1 | Mitattu signaali aikatasossa..... | 49 |
| 6.2 | Mitatun signaalin esittäminen taajuustasossa..... | 50 |
| 6.2.1 | Kaikkien paineantureiden signaalit taajuustasossa | 50 |
| 6.3 | Viivakuorma | 54 |
| 6.4 | Kokonaiskuorma | 59 |
| 7 | <i>Mittausten analysointi ja tulokset</i> | 61 |
| 7.1 | Laivan liikkeet: jyskintä ja kohoilu | 62 |
| 7.2 | Viivakuorman vertailu | 63 |
| 7.3 | Paineiden vertailu | 69 |
| 7.4 | Kokonaisvoiman vertailu | 73 |
| 7.5 | Analyysin rajoitukset | 80 |
| 8 | <i>Johtopäätökset</i> | 81 |
| | <i>Lähdeluettelo</i> | 83 |
| | <i>Liite A Pinnan normaalivektorit</i> | 85 |
| | <i>Liite B Taajuussisältö</i> | 87 |
| | <i>Liite C Pystysuuntainen kuorma kaarilla</i> | 103 |
| | <i>Liite D Pystysuuntainen kokonaiskuorma</i> | 111 |

Symboliluettelo

Merkinnät

| | |
|--------------|---|
| A_w | aallon amplitudi |
| A_f | efektiivinen amplitudi |
| c | vaimennuskerroin |
| c_w | aallon nopeus |
| e_z | vääntökeskiön korkeussuuntainen sijainti |
| E | kimmokerroin, energia |
| f_y | voima poikkileikkauksessa y -akselin suuntaan |
| f | taajuus |
| f_e | kohtaamistaajuus |
| f_0 | aallokon modaalitaajuus |
| f_N | näytteistystaajuus |
| F | voima |
| g | putoamiskiihtyvyys |
| G | liukukerroin |
| h | veden syvyys |
| H_w | aallonkorkeus |
| H_S | merkittävä aallonkorkeus |
| H_1 | karakteristinen aallonkorkeus |
| J_y | taivutusjäykkyys y -akselin ympäri |
| J_{yz} | vääntöjäykkyys x -akselin ympäri |
| k | jousivakio, aaltoluku |
| k_n | yleistetty jäykkyys ominaisuudolle n |
| m | ominaismassa, massa |
| m_{add} | lisätty massa |
| m_n | n :en ominaisuudon yleistetty massa, n :s spektrimomentti |
| M | laskentapisteen lukumäärä |
| M_y | taivutusmomentti y -akselin ympäri |
| M_{yz} | vääntömomentti x -akselin ympäri |
| \mathbf{n} | pinnan normaalivektori |

| | |
|---------------|--|
| n_x | pinnan normaalivektorin x -koordinaattisuunnan komponentti |
| N | vapausasteiden lukumäärä, näytteiden lukumäärä |
| p | paine |
| s | poikkileikkauspinnan koordinaatti |
| S | spektrin amplitudi |
| t | aika |
| T | periodi |
| T_0, T_P | aallokon modaaliperiodi |
| T_1 | keskimääräinen aaltojen jakso |
| T_N | näytteen pituus |
| U | nopeus |
| V | laivan-, mallin nopeus |
| w_n | palkin n :en ominaismuodon taipuma |
| w | Hanning ikkunafunktio |
| x, y, z | kartesisen koordinaatiston koordinaatti |
| x | aikatason funktio |
| X | Fourier-muunnos, taajuustason funktio |
| α | aallon jyrkkyys |
| β | kohtaamiskulma |
| δ | taipuma |
| Δ | suureen muutos |
| ε | spektrin leveyden parametri |
| ζ | vaimennussuhde |
| η | vapaan nestepinnan poikkeama normaalitasosta |
| θ | palkin kiertymä |
| λ | aallonpituus |
| ν | Poisson'n vakio |
| ρ | veden tiheys |
| ω | aallokon kulmataajuus |
| ω_0 | aallokon modaalitaajuus |
| ω_n | vaimentamattoman värähtelyn ominaistaajuus |
| ω_d | vaimennetun värähtelyn ominaistaajuus |

ω_E kohtaamiskulmataajuus

Lyhenteet

| | |
|-----|--|
| KVV | Konstruktiovesiviiva |
| FFT | Fourier-muunnos, Fast Fourier Transform |
| DFT | diskreetti Fourier-muunnos, Discrete Fourier Transform |
| FEM | elementtimenetelmä, Finite Element Method |
| PSD | tehospektri, Power Spectral Density |
| RMS | tehollisarvo, Root-Mean-Square |

1 Johdanto

1.1 Työn tausta

Pienten aaltojen aiheuttamasta laivan rungon värähtelyherätteestä tai sen luonteesta ei ole paljon tietoa. Pienillä aalloilla tarkoitetaan tässä laivan koon suhteen pieniä aaltoja. Aallonpituus on alle puolet laivan pituudesta ja korkeus sadasosan luokkaa laivan pituudesta. Pienen aallokon on kuitenkin todettu herättävän laivan ensimmäisten ominaismuotojen värähtelyä. Värähtelyn herätevoima on verrattain pieni, mutta silti se vaikuttaessaan pidemmän aikaa herättää värähtelyä. Pidempikestoinen värähtely väsyttää rakenteita ja on epämukavaa matkustajille. Erityisesti risteilylaivoissa matkustusmukavuus on tärkeää, jolloin värähtelyjen minimointi on oleellisessa osassa laivaa suunniteltaessa. Laivan rakenteesta pystytään laskemaan ominaisvärähtelymuodot ja niiden taajuudet hyvinkin tarkasti. Kuormituksen arviointi todellisessa operointitilanteessa taas on hankalaa. Jos herätevoimat olisivat tarkasti tiedossa, voitaisiin rakenteen vaste laskea. Tällöin rakenteiden suunnittelulla voitaisiin vähentää värähtelytasoja. Lisäksi tieto rungon muodon vaikutuksesta herätevoimien suuruuteen olisi erittäin tärkeä. Silloin olisi mahdollista rungon muotoilulla vaikuttaa syntyviin herätevoimiin

Aallokon aiheuttamaa laivan rungon värähtelyä on karkean jaon mukaan kahden tyyppistä. Transienttityyppistä yhden voimakkaan impulssin aiheuttamaa värähtelyä, joka vaimenee nopeasti pois. Tätä kutsutaan whippingiksi, jonka aiheuttaa slammingiksi kutsuttu iskumainen kuorma. Slamming herätteitä esiintyy yleensä korkeassa aallokossa, jossa laivan liikkeetkin ovat usein suuria. Toisentyyppinen värähtely on pitkäkestoista vähitellen nousevaa värähtelyä. Tätä taas kutsutaan springingiksi. Tässä tutkimuksessa keskitytään springingiä aiheuttavan herätteen arviointiin. Pienikin jaksollinen kuormitus aiheuttaa värähtelyä, jos värähtelijän, tässä tapauksessa laivan rungon, ominaistaajuuudet ovat samansuuruiset kuin kuormituksen tai sen monikerran taajuus. Springing värähtelyä on havaittu laivan kokoon verrattuna hyvin pienillä aallon korkeuksilla. Pienessä aallokossa aaltojen pituus on myös pienempi, jolloin helposti vasta-aallokkoon tai sivuvastaiseen aallokkoon ajettaessa saattaa laivan ja aallokon kohtaamistaajuuden ja laivan rungon

ominaistaajuuksien välille syntyä resonanssitilanne. Laivan rungon ensimmäiset eli pienimmän ominaistaajuuden omaavat värähtelymuodot ovat laivapalkin pysty- ja poikittaissuuntainen värähtely sekä vääntövärähtely. Laivan mittakaavan kasvaessa, eli rakennettaessa yhä isompia laivoja, ominaismuotojen värähtelytaajuuudet pienenevät, jolloin resonanssitilanne syntyy suuremmallakin aallokolla.

Slamming tyyppisiä kuormituksia on tutkittu paljon aikaisemmin. Springing kuormitus ei ole saanut läheskään yhtä paljon huomiota [1]. Yhtenä syynä tähän on herätevoiman pienuus, joka tekee siitä vaikeasti mitattavan suureen. Ensimmäiset springing ilmiöön keskittyneet mittaukset ovat laivamittakaavan mittauksia. Myöhemmin Troesch on tutkinut ilmiötä mallikokeilla käyttäen segmentoitua mallia [2]. Muutoin jäykkä malli on jaettu osiin, segmentteihin, joiden välisestä liitoskohdasta malli pääsee taipumaan. Liitoskohtien jäykkyys on verrannollinen laivan jäykkyyteen. Segmentoidun mallin kokeissa on mitattu mallin pystysuuntainen taipuma eli vaste, jonka avulla on laskettu heräte. Viime aikoina numeerisia menetelmiä on kehitetty herätevoimien laskemiseksi. Tähän asti ne eivät ole täysin pystyneet ennustamaan laivalla mitattuja värähtelyarvoja. Karno Tenovuo on diplomityössään arvionut springing herätettä mittaamalla vastetta laivalla [3]. Sen perusteella tiedetään, että suurimmat herätevoimat syntyvät vasta- ja sivuvastaisessa aallokossa keulan alueella lähellä laivan vesiviivan olkapäitä.

1.2 Tavoitteet

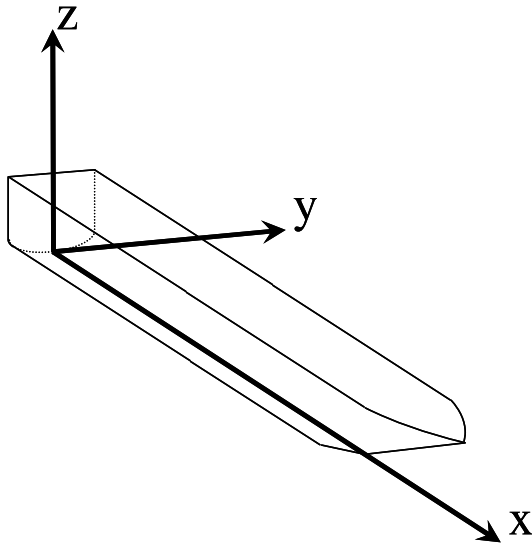
Tässä tutkimuksessa arvioidaan herätevoimia suoraan painemittausten tuloksista. Näistä mallikoemittauksista tekee erityisen kiinnostavan se, ettei springing ilmiötä ole aikaisemmin tutkittu mittaamalla mallikokeilla paine useista pisteistä samanaikaisesti suurella taajuudella. Tutkimuksessa pyritään selvittämään kuormituksen luonne. Pyritään vastaamaan kysymykseen, mille kohtaa runkoa kuormitus osuu millä voimakkuudella ja mikä on kuormituksen taajuussisältö. Toisin sanoen, määrittämään minkälainen kuormitus on eri aallokon ja kohtauskulman tapauksissa. Pyritään toteamaan yhteys aallokon ja kuormituksen välillä tietynmallisella runkomuodolla ja vastaamaan kysymykseen kuinka rungon muoto vaikuttaa herätteeseen. Tässä tutkimuksessa keskitytään vain herätteen arviointiin. Mallikokeissa käytetty aallokko oli epäsäännöllistä aallokkoa.

1.3 Työn sisältö

Jotta näihin työn tavoitteessa esitettyihin kysymyksiin pystyttäisiin vastaamaan, on aluksi pohdittava värähtelyn dynamiikkaa laivan rungon osalta. Työssä esitellään aluksi kuinka ominaismuodot voidaan yksinkertaistaa moniksi yhden vapausasteen värähtelijän tapauksiksi. Tämän perusteella voidaan paremmin ymmärtää kuinka herätettä pitäisi tulkita ja esittää. Tässä työssä on käytetty epäsäännöllistä aallokkoa mallikokeissa. Herätteen aiheuttajana on aallokko, joten myös aalokkoon liittyviä käsitteitä esitellään. Seuraavaksi kerrotaan tarkemmin mitä mallikokeita on tehty ja mitä on mitattu paineiden lisäksi. Tämän jälkeen kerrotaan kuinka herätevoima lasketaan mitatuista painesignaaleista. Herätevoiman sekä mitattujen paineiden käsittely ja niiden esittämistapa esitellään. Lopulta mittauksista saadut tulokset tuodaan esille ja pohditaan näiden tulosten syitä ja merkitystä

2 Rungon värähtelyt ja aallokko

Määritellään aluksi tässä työssä käytettävä koordinaatisto. Koordinaatiston origo on kiinnitetty keskelle laivaa köliiviivan ja peräperpendikelin tason leikkauspisteeseen, x-akseli osoittaa keulan suuntaan, y-akseli vasemmalle sivulle ja z-akseli ylöspäin (Kuva 1).



Kuva 1. Käytetty koordinaatisto.

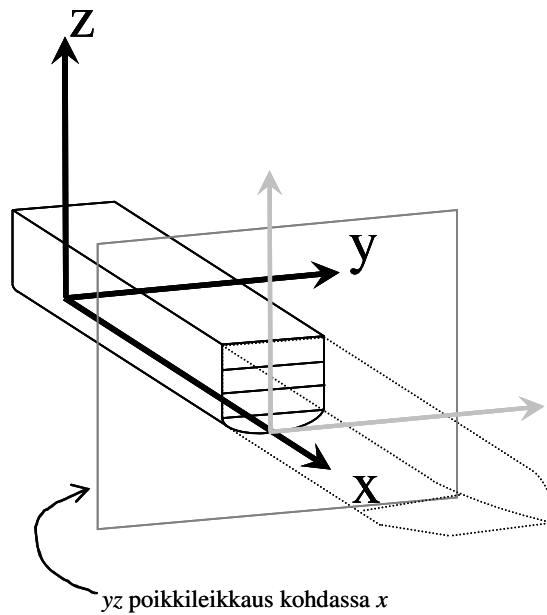
Tässä työssä puhutaan laivan kaarista poikkileikkauksien sijainteina x -suunnassa, ei varsinaisista fyysisistä rakenteellisista kaarista. Laiva on pituussuunnassa jaettu 20 konstruktiokaareen, siten että ensimmäinen kaari sijaitsee peräperpendikelin kohdalla ja 20. kaari keulaperpendikelin kohdalla.

2.1 Laivapalkki

Laivan globaalia käyttäytymistä tarkasteltaessa, voidaan käsitellä laivaa palkkina. Niin sanottu laivapalkki on palkkimalli koko laivan rungosta. Tämä malli yksinkertaistaa huomattavasti laskentaa. Palkin poikkileikkauksen (Kuva 2) ominaisuudet ovat taivutusjäykkyydet $J_y(x)$, $J_z(x)$, vääntöjäykkyys $J_{yz}(x)$, palkin ominaismassa $m(x)$ pituutta kohti ja vääntökeskiön sijainti korkeussuunnassa e_z . Vääntökeskiö sijaitsee aina symmetria-akselilla, joten poikkitaissuunnassa sijainti on keskellä laivaa. Poikkileikkauksen ominaisuudet riippuvat poikkileikkauksen

geometriasta sekä materiaalin kimmo-ominaisuuksista; kimmokertoimesta E , liukukertoimesta G ja Poisson'n vakiosta ν . Ominaisuudet saattavat vaihtua palkin pituuden matkalla tai olla samat koko pituudella. [4]

2.1.1 Poikkileikkauksen ominaisuudet



Kuva 2. Laivapalkin poikkileikkaus kohdassa x .

Poikkileikkaukselle lasketaan taivutusjäykkyydet y ja z suuntiin. Pystysuuntaisen y -akselin ympäri taivuttavan momentin $M_y(x)$ vaikuttaessa laivapalkkiin se taipuu x kohdassa $\delta_z(x)$ verran. Taipuman $\delta_z(x)$ ja momentin $M_y(x)$ välillä on seuraava yhteys, jota kutsutaan palkin taipumaviivan differentiaaliyhtälöksi:

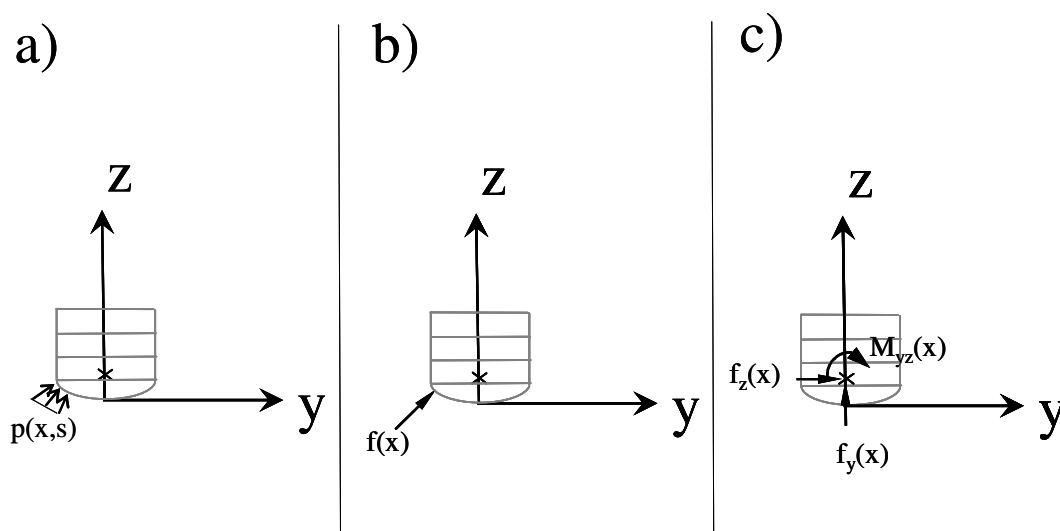
$$J_y(x) \frac{d^2 \delta_z(x)}{dx^2} = -M_y(x). \quad (2-1)$$

Poikittaissuuntaisen taivutus momentin $M_z(x)$ ja poikittaissuuntaisen taivutusjäykkyyden $J_z(x)$ välillä on voimassa sama differentiaaliyhtälö kuin pystysuuntaisessa taivutuksessa.

Vääntöjäykkyys $J_{yz}(x)$ kertoo yhteyden palkin kiertymän $\theta(x)$ ja vääntömomentin $M_{yz}(x)$ välillä:

$$M_{yz}(x) = J_{yz}(x)\theta(x). \quad (2-2)$$

Laivapalkkiin vaikuttavat voimat johtuvat veden hydrostaattisesta sekä dynaamisesta paineesta. Värähtelyjen kannalta staattisella paineella ei ole merkitystä. Hydrodynaaminen paine, joka aiheutuu laivan kulkiessa tyynessä vedessä, katsotaan myös olevan värähtelyjen kannalta staattinen. Kohdatun aallokon synnyttämä muuttuva painekenttä aiheuttaa värähtelyä herättävän kuormituksen. Lisäksi laivan liikkeitä aallokossa, kuten jyskintä ja kohoilu, aiheuttavat lisän muuttuvaan painekenttään. Tämä paine vaikuttaa laivapalkkiin rungon pinnan kautta. Pinnalla vaikuttava paine voidaan redusoida viivakuormaksi. Laivan kaarelle kohdistuneen paineen redusointi poikkipinnan yli on esitetty kuvassa 3.

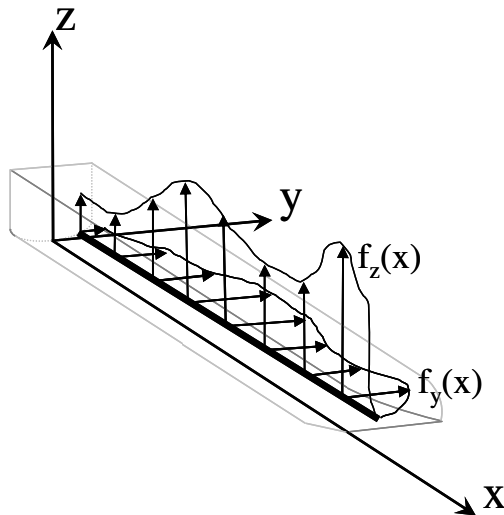


Kuva 3. Poikkipintaan vaikuttavan painejakauman $p(x,s)$ redusointi voimiksi f_y ja f_z sekä vääntömomentiksi M_{yz} , jotka vaikuttavat vääntökeskiöön. Kuvassa a) koordinaatti s on etäisyys köliiviivasta kaarta pitkin.

Poikkipinnalla vaikuttaa paine $p(x,s)$, jossa s on kaaren pintaa pitkin etenevä koordinaatti (Kuva 3a). Painejakauma integroidaan kaarella vaikuttavaksi resultanttivoimavektoriksi $f(x)$, integrointi tapahtuu kaarta pitkin koordinaatin s yli (Kuva 3b). Voimavektori $f(x)$ asetetaan vaikuttamaan vääntökeskiöön. Koska voimavektori aiheuttaa alkuperäisellä sijainnillaan myös momentin M_{yz} vääntökeskiön ympäri, asetetaan tämä momentti myös vaikuttamaan vääntökeskiöön (Kuva 3c). Voimavektori on jaettu y ja z suuntaisiin komponentteihin f_y ja f_z . [5]

2.1.2 Viivakuorma

Edellä on esitetty kuinka painejakaumasta poikkipinnalle saadaan redusoitua resultanttivoimat vääntökeskiöön. Nämä voimat ovat siis laskettu jokaiselle poikkileikkaukselle erikseen, joten ne muodostavat x -suunnassa jakautuneen kuorman (Kuva 4).



Kuva 4. Laivapalkkiin kohdistuva viivakuorma.

Palkkiin kohdistuvat viivakuormat riippuvat myös ajasta. Kuormitus vaihtelee laivan kohdatessa aaltoja.

2.1.3 Laivapalkin värähtelyt, ominaismuodot

Palkille voidaan laskea värähtelyjen ominaismuodot ja jokaisen ominaismuodon taajuuudet. Laivapalkille ominaismuotoihin ja niiden taajuuksiin vaikuttaa palkin ominaisuuksien lisäksi hydrodynaaminen vuorovaikutus. Tämä otetaan huomioon niin sanotun lisätyn massan avulla. Palkin ominaismassaan lisätään veden massa, jota laivapalkki liikuttaa mukanaan värähdellessään vedessä. Laivapalkin jäykän kappaleen liikkeen kolmelle suunnalle sisältyy myös palauttava voima, nämä ovat kohoilu (liike z -suunnassa), keinunta (liike x -akselin ympäri) ja jyskintä (liike y -akselin ympäri). Palauttavan voiman takia liikkeet näissä suunnissa ovat myös jaksollisia värähtelyjä, mutta näiden taajuuudet ovat kuitenkin huomattavasti palkin ominaismuotojen taajuuksia pienempiä. Tarkemmin ottaen nämä ovat myös

ominaismuotoja, mutta niitä ei oteta tässä huomioon, sillä laivapalkin ominaisuuksista muu kuin painojakauma ei vaikuta näihin jäykän kappaleen värähtelymuotoihin. Tässä työssä keskitytään laivapalkin värähtelyitä aiheuttaviin voimiin eikä merikelpoisuuteen.

Palkin värähtelyille voidaan johtaa ajasta riippuva yhtälö lähtien palkin differentiaaliyhtälöstä (2-1) ja ajasta riippuvasta voimajakaumasta $f_z(x,t)$ [7]. Yhtälön ensimmäisessä termissä on mukana lisätty massa $m_{add}(x)$. Liikkeyhtälö palkille:

$$\{m(x) + m_{add}(x)\} \frac{\partial^2 \delta_z(x,t)}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[J_y(x) \frac{\partial^2 \delta_z(x,t)}{\partial x^2} \right] = f_z(x,t). \quad (2-3)$$

Tässä on esitetty analyyttinen yhtälö z -suunnan taipumalle. Samalla tavoin saadaan yhtälö y -suunnalle. Asettamalla yhtälössä (2-3) kuormitus $f_z(x,t)$ nolllaksi, voidaan ratkaista palkin ominaismuodot ja niiden taajuudet etsimällä yhtälön toteuttavat ratkaisut $w_n(x,t)$. Yhtälön ratkaisut ovat separoituvaa muotoa eli $w_n(x,t) = X_n(x)T_n(t)$, missä ominaismuotoa n vastaa funktio $X_n(x)$ ja sen taajuutta aikatasossa ratkaisun $T_n(t)$ taajuus. Ratkaisujen summa toteuttaa myös differentiaaliyhtälön eli ratkaisut ovat superponoituvia. Jokaisella ominaismuodolla on oma taajuus. Ratkaisujen superponoituvuudesta seuraa lisäksi, että voidaan tarvittaessa keskittyä ainoastaan yhteen ominaismuotoon ja sen taajuuteen. Tästä päästään niin sanottuun moodianalyysiin.

Käytännössä laivapalkin ominaismuodot lasketaan käyttäen elementtimenetelmää. Laivapalkin ensimmäiset ominaismuodot eli ominaismuodot, joiden värähtelytaajuudet ovat alhaisimmat, ovat pystysuuntainen kaksisolmuinen taivutusmuoto, poikittainen kaksisolmuinen taivutusmuoto tai vääntö. Näiden värähtelyiden taajuus risteilijä aluksessa on noin 1 hertsin luokkaa. Jos laivapalkkia pidennetään ja taivutusjäykkyys jakauma säilytetään samana, ominaismuotojen taajuudet pienenevät [6].

2.1.4 Vaste herätteeseen

Tässä tutkimuksessa on tarkoitus keskittyä herätekuormien arviointiin, ei laivan dynamiikkaan ja vasteeseen. Silti tapa, jolla painemittauksien tuloksia tulisi käsitellä,

riippuu siitä minkälaisen vasteen heräte saa aikaan. On hyvä tietää värähtelyn dynamiikasta sen verran, että pystytään löytämään mittaustuloksista oleellista tietoa.

Seuraavaksi esitellään miten liikeyhtälö saadaan moodianalyysin keinoin hajotettua useaksi yhden vapausasteen värähtelijän liikeyhtälöksi sekä laskettua näihin liittyvät yleistetyt parametrit.

Moodianalyysi [7] perustuu ominaismuotojen $X_n(x)$ ortogonaalisuuteen toisin sanoen muodoilla ei ole kontribuutiota toistensa kanssa jolloin:

$$\int_0^L X_i(x) X_j(x) dx = \begin{cases} 0 & , \text{kun } i \neq j \\ 1 & , \text{kun } i = j \end{cases} . \quad (2-4)$$

Integraalin arvo on nolla kun $i \neq j$, muutoin integraali saa nollasta poikkeavan arvon. Ominaismuodot $X_n(x)$ normeerataan, eli ominaismuoto kerrotaan jollain sopivalla vakiolla, jotta sisätulo integraalista saadaan arvoksi yksi kun $i=j$. Tällöin puhutaan ortonormaaleista ominaismuodoista.

Liikeyhtälössä eri ominaismuodot voidaan erottaa erillisiksi yhtälöiksi ortogonaalisuuden perusteella. Yksinkertaistetaan palkin liikeyhtälöä (2-3) asettamalla taivutusjäykkyys ja massajakauma vakioksi. Massajakaumaa ja lisättyä massa merkitään tässä m :llä:

$$m \frac{\partial^2 \delta_z(x,t)}{\partial t^2} + J_y \frac{\partial^4 \delta_z(x,t)}{\partial x^4} = f_z(x,t) \quad (2-5)$$

ja sijoitetaan tähän taipuman δ_z tilalle separoitu ratkaisu $w_n(x,t)=X_n(x)T_n(t)$:

$$m \frac{\partial^2 X_n(x)T_n(t)}{\partial t^2} + J_y \frac{\partial^4 X_n(x)T_n(t)}{\partial x^4} = f_z(x,t) . \quad (2-6)$$

Derivoidaan separoidun ratkaisun osia ajan ja paikan suhteen, jolloin saadaan:

$$mX_n(x)\ddot{T}_n(t) + J_y X_n^{(4)}(x)T_n(t) = f_z(x,t) . \quad (2-7)$$

Ominaismuodot palkille ovat trigonometrisia funktioita $X_n(x) = A \cos(\beta_n x) + B \sin(\beta_n x) + C \cosh(\beta_n x) + D \sinh(\beta_n x)$, jolloin ominaismuodon neljäs derivaatta on itse ominaismuotofunktio kerrottuna trigonometrisen funktion sisällä olevan vakion neljännellä potenssilla $X_n^{(4)}(x) = \beta^4 X_n(x)$. Kerrotaan yhtälö (2-7) ominaismuodon funktiolla $X_n(x)$ ja integroidaan pituuden yli:

$$\int_0^L [m \ddot{T}_n(t) + J_y \beta^4 T_n(t)] X_n(x) X_n(x) dx = \int_0^L f_z(x, t) X_n(x) dx. \quad (2-8)$$

Integroinnin tuloksena saadaan yhden vapausasteen värähtelijän yhtälö:

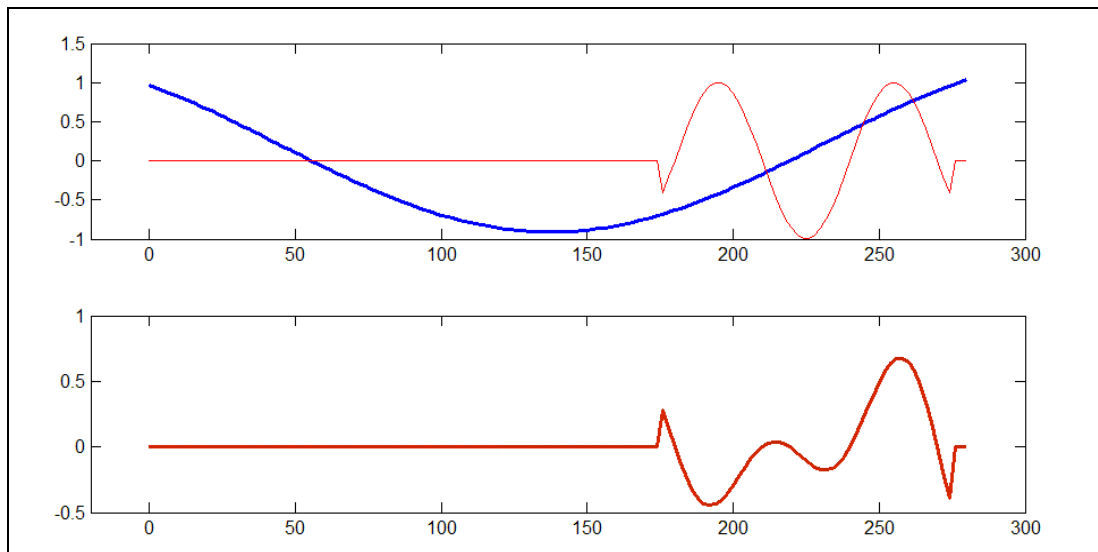
$$m_n \ddot{T}_n(t) + k_n T_n(t) = F_{zn}(t). \quad (2-9)$$

Yhtälössä (2-9) oikealla puolella $F_{zn}(t)$ on yleistetty voima n :lle ominaismuodolle.

Yleistetty voima saatiin kertomalla voimajakauma ominaismuodolla ja integroimalla palkin pituuden yli (Kuva 5). Integroitaessa pituuden yli saadaan myös yleistetty massa m_n sekä yleistetty jäykkyys k_n kyseiselle ominaismuodolle. Tässä tapauksessa oli asetettu massajakauma ja taivutusjäykkyys vakioksi, joten yhtälössä (2-8) nämä jäävät ensimmäisen termin integraalin ulkopuolelle. Yleistetystä massasta käytetään myös nimitystä *generalized mass* ja tällaisesta yleistetystä yhtälömuodosta (2-9) nimitystä *generalized parameter system*. Palkin liikeyhtälö on jaettu toisistaan riippumattomien ominaismuotojen erillisiksi yhtälöiksi. Mielivaltainen palkin taipumamuoto voidaan esittää ominaismuotojen summana. Sama voidaan tehdä elementtimenetelmää käytettäessä, tällöin ominaismuotoja on N kappaletta. Elementtimenetelmän vapausasteiden määrä on N . Elementtimenetelmämallin toisistaan riippumattomia yhden vapausasteen yhtälöitä on tällöin N kappaletta. Elementtimenetelmää käytettäessä saadaan samoin laskettua yleistetty voima, jolloin integroinnin korvaa voimavektorin ja ominaisvektorin pistetulo.

Edellä esitetystä yleistetyn voiman käsitteestä huomataan, että kokonaisvoiman vaikutuskohdalla on suuri merkitys yleistetyn voiman suuruuteen. Voimalla, joka kohdistuu ominaismuodon suurimpien taipumien kohdalle, on suurin vaikutus kyseisen ominaismuodon yleistettyyn voimaan. Kun taas solmupisteeseen

kohdistuvalla voimalla ei ole vaikutusta yleistettyyn voimaan. Lisäksi riippuen voimajakauman muodosta, jakauma saattaa toisella kohtaa vaikuttaa positiivisesti ja toisella kohtaa negatiivisesti yleistettyyn voimaan. Voimajakauman kyky herättää tietyn ominaismuodon värähtelyä riippuu siitä, kuinka suuren yleistetyn voiman se aiheuttaa kyseiselle ominaismuodolle ja mikä on tämän yleistetyn voiman taajuus. Voima, joka vaikuttaa jonkin ominaismuodon ominaistaajuudella, mutta kohdistuu tämän ominaismuodon solmupisteeseen, ei pysty aiheuttamaan tämän ominaismuodon värähtelyä.



Kuva 5. Yleistetty voima. Ylemmässä kuvassa on paksulla sinisellä ensimmäinen ominaismuoto $X_1(x)$ ja kuormitusjakauma $f_2(x,t)$. Alemmassa kuvassa on kuormitusjakauma kerrottu ominaismuodolla, tätä integroimalla palkin pituuden yli saadaan yleistetty voima ensimmäiselle ominaismuodolle.

Edellä johdettu yhtälö (2-9) on yhden vapausasteen värähtelijän yhtälö. Kirjoitetaan yhden vapausasteen liikeyhtälö seuraavassa yleisessä muodossa:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) . \quad (2-10)$$

Yhtälö (2-10) on analoginen yhtälön (2-9) kanssa. Massa m vastaa yleistettyä massaa m_n ja jäykkyys k yleistettyä jäykkyyttä k_n . Vaimennuskerroin c taas vastaisi palkin yleistettyä vaimennuskerrointa, jos se olisi otettu huomioon palkin liikeyhtälössä (2-3).

Esitellään seuraavaksi yhden vapausasteen värähtelijän vasteen laskenta mielivaltaisesti ajan suhteen muuttuvalle herätteelle. Laskenta perustuu ratkaisujen superponointiin. Superponointi toteutetaan laskemalla herätteen ja ratkaisujen välinen konvoluutio integraali eli niin sanottu *Duhamelin integraali*, esitetty tarkemmin lähteessä [7]. Kun värähtelijään on ajan hetkellä t_i vaikuttanut yksikön suuruinen impulssi, on liikeyhtälön ratkaisu $h(t-t_i)$ seuraava:

$$h(t-t_i) = \frac{1}{m\omega_d} e^{-\zeta\omega_n(t-t_i)} \sin \omega_d(t-t_i) \quad , \text{ kun } t > t_i . \quad (2-11)$$

Yhtälössä (2-11) $\omega_d^2 = \omega_n^2(1-\zeta^2)$ on vaimennetun värähtelyn ominaistajuus, $\omega_n^2 = k/m$ on vaimentamattoman värähtelyn ominaistajuus ja $\zeta = c/(2\sqrt{km})$ on vaimennussuhde.

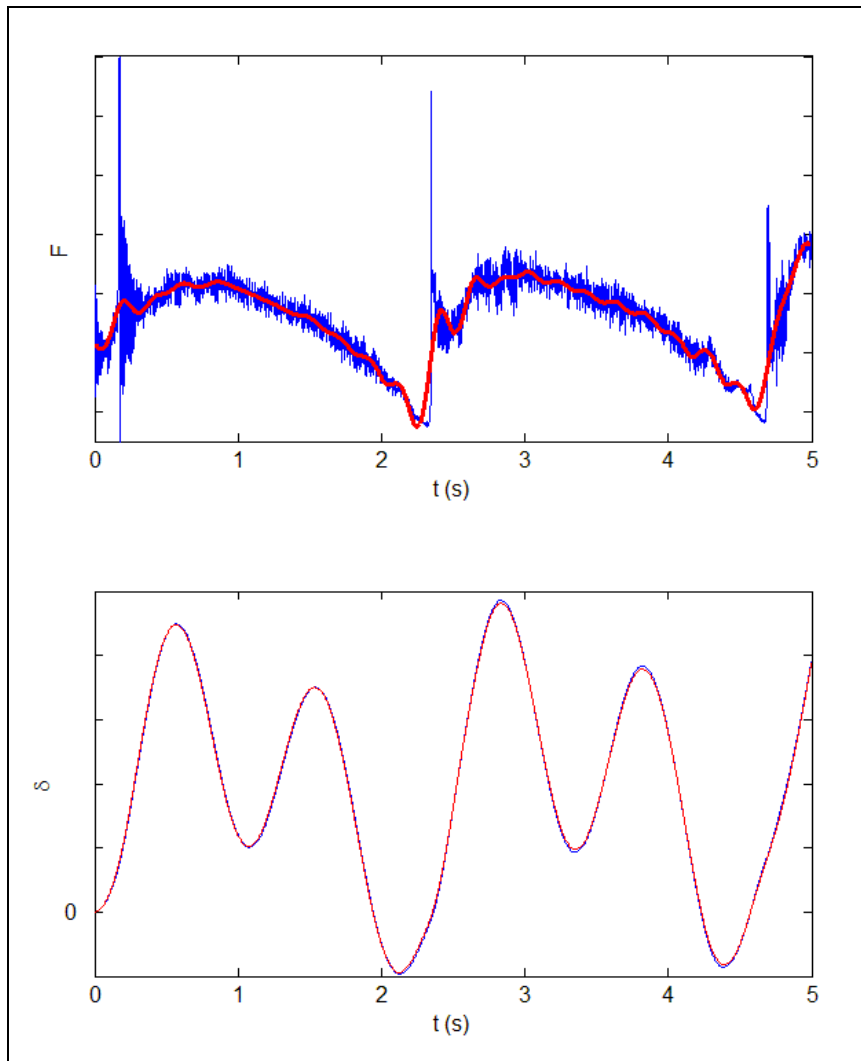
Kun herätevoima $F(t)$ diskreeteillä ajan hetkillä on tiedossa, saadaan vaste $x(t_j)$ laskettua summaamalla yksittäisten impulssien ratkaisuja:

$$x(t_j) = \sum_{i=1}^j F(t_i)h(t_j-t_i)\Delta t . \quad (2-12)$$

Vaimentamattomalle yhden vapausasteen värähtelijälle, jonka ominaistajuus on 1 Hz, on kuvan 6 esimerkissä laskettu vaste yhtälön (2-12) mukaan. Vaste on laskettu sekä suodattamattomalle että suodatetulle herätteelle. Molemmat herätteet $F(t)$ ajan funktiona ovat piirrettynä samaan kuvaan (ylempi kuva 6). Herätteiden aiheuttamat vasteet $x(t)$ ovat ajan funktiona piirrettynä samaan kuvaan (alempi kuva 6). Vasteet ovat lähes identtiset vaikka korkea piikki on suodattanut herätteestä pois.

Herätevoiman ajallinen kesto on oleellinen värähtelyiden heräämisen kannalta. Jos herätevoiman kesto on lyhyt, sen impulssi on myös pieni, eikä se tällöin riitä herättämään värähtelyä. Toisaalta, jos herätevoiman kesto on kovin pitkä, tällöin ainoastaan voiman nousu aiheuttaa värähtelyä. Kuvan 6 herätevoimaa ja vastetta vertaamalla voidaan todeta, että vaste on ensimmäisellä jaksolla, ensimmäisen sekunnin aikana, noussut korkeammalle tasolle kuin toisella, toisen sekunnin aikana (alempi kuva). Ajanhetkellä 0.5 s – 1.0 s herätteen voima vaikuttaa värähtelijän liikesuuntaa vastaan ja heikentää amplitudin tasoa. Värähtelijän kolmannella

jaksolla, noin 3 sekunnin kohdalla, herätevoima on osunut samaan suuntaan kuin värähtelijän liikesuunta, jolloin värähtelyn amplitudi on kasvanut. Se kuinka paljon herätevoima pystyy herättämään värähtelyä, riippuu siitä kuinka samanaikaisesti herätevoiman vaikutussuunta ja vasteen liikesuunta osuvat kohdalleen. Taajuustason tarkastelu kertoo kuinka paljon herätevoimalla on osuutta värähtelijän ominaistaajuudelle.



Kuva 6. Ylemmässä kuvassa heräte. Suodattamaton heräte sinisellä ja suodatettu punaisella. Suodatetusta herätteestä on suodatettu yli 5 Hz komponentit pois. Näiden kahden eri herätteen aiheuttama vaste (alempi kuva) yhden vapausasteen värähtelijälle.

2.2 Aallokko

Laivaan vaikuttavien ilmiöiden kannalta tärkein aallokko on tuulen muodostama aallokko. Sääolot eivät koskaan ole täysin samanlaiset, joten todellinen aallokkokin on joka ajan hetkellä erilainen ja riippuu sekä aikaisemmin vallinneista että senhetkisistä tuuliolosuhteista. Eri merialueilla voidaan kuitenkin tilastoida vuodenajan mukaan vallitsevia olosuhteita ja siten vallitsevia tai todennäköisimmin kohdattavia aalto-olosuhteita [8]. Todellisuudessa säännöllistä aallokkoa ei esiinny, mutta tässä esitellään silti seuraavaksi säännölliseen aallokon mallinnuksessa käytettyjä teorioita, jotka antavat pohjan epäsäännöllisen aallokon malleille.

2.2.1 Säännöllinen aallokko

Säännöllisellä aallokolla tarkoitetaan monokromaattista aallokkoa eli aallokkoa, joka sisältää vain tietyn pituisia aaltoja ja joiden korkeus on vakio. Aallon korkeus H_w on pystysuuntainen etäisyys aallon pohjasta aallon harjaan. Aallon amplitudi on puolet aallonkorkeudesta $A_w = H_w/2$. Yksinkertaisin lineaarinen aaltomalli on Airyn aallokko. Lineaarisessa Airyn aallokkomallissa veden pinta on sinikäyrän muotoinen ja pinnan korkeuden yhtälö on seuraava aallon edetessä x -koordinaattiakselin suuntaan:

$$\eta(x, t) = A_w \sin(\omega t - kx) . \quad (2-13)$$

Yhtälössä (2-13) $k=2\pi/\lambda$ on aaltoluku, ω on aallokon kulmataajuus. Aallon nopeus c_w riippuu aallon pituudesta sekä veden syvyydestä. Aallon nopeus c_w tarkoittaa aallon harjan nopeutta. Aallon nopeus riippuu maan putoamiskiihtyvyydestä g , sekä veden syvyydestä h . Lineaarista aaltomallia käytettäessä seuraava dispersio yhtälö antaa yhteyden aaltoluvun k ja aallon taajuuden välillä:

$$\omega^2 = gk \tanh kh . \quad (2-14)$$

Yhtälössä (2-14) hyperbolinen tangenttitermi lähestyy arvoa 1, kun veden syvyyden ja aallonpituuden ja suhde kasvaa. Syvässä vedessä voidaan siten käyttää seuraavaa dispersio yhtälöä:

$$\omega^2 = gk . \quad (2-15)$$

Yhtälöstä (2-15) saadaan syvässä vedessä aallon pituus λ kun sijoitetaan siihen aaltoluku k :

$$\lambda = \frac{2\pi g}{\omega^2} . \quad (2-16)$$

Aallon nopeus c_w syvässä vedessä saadaan laskettua aallon pituudesta jakamalla se periodilla T :

$$c_w = \frac{\lambda}{T} = \frac{\lambda \omega}{2\pi} = \frac{g}{\omega} . \quad (2-17)$$

Pidemmillä aalloilla on suurempi aallon nopeus. Aallonkorkeuden ja aallon pituuden suhteella eli aallokon jyrkkyydellä on tietty yläraja. Kovin jyrkkä aallokko murtuu. Aallon korkeuden ja pituuden suhteelle on esitetty seuraavanlainen kriteeri ennen aallon murtumista. [9]

Syvässä vedessä (Mitchell limit):

$$\frac{H_w}{\lambda} > 0.142 \quad (2-18)$$

Matalassa vedessä (Miche formula):

$$\frac{H_w}{\lambda} > 0.14 \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \quad (2-19)$$

Aallon pinnan jyrkkyys saadaan derivoimalla pinnan yhtälöä $x:n$ suhteen. Jyrkkyyden amplitudi radiaaneina on tällöin:

$$\alpha = kA_w = \frac{2\pi}{\lambda} A_w = \frac{\omega^2}{g} A_w = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \frac{A_w}{g} . \quad (2-20)$$

Tässä on käytetty syvän veden dispersio yhtälöä (2-15). Näin ollen edellinen yhtälö on voimassa syvässä vedessä lineaariselle aaltomallille.

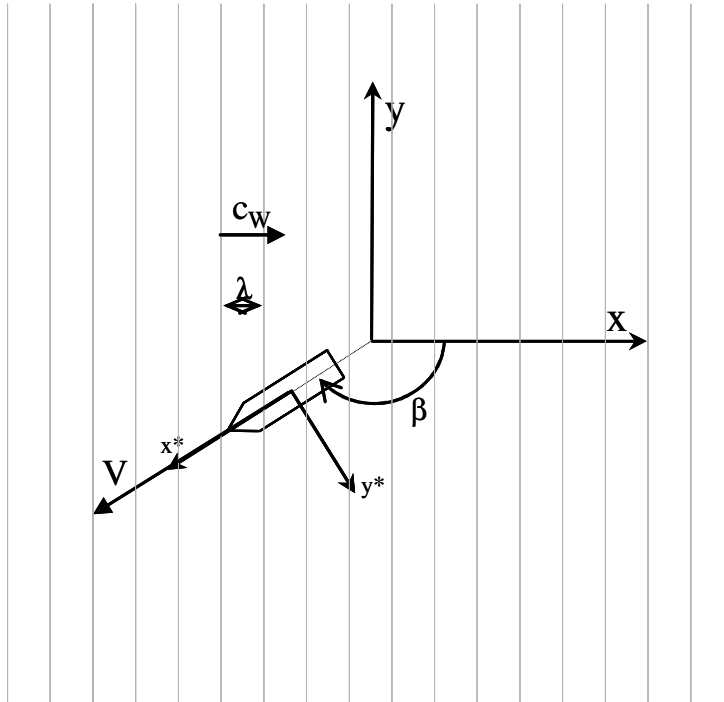
Aallokon sisältämä energia riippuu aallon korkeudesta. Energia neliömetriä kohden on [10]:

$$E = \frac{1}{2} \rho g \left(\frac{H_w}{2} \right)^2. \quad (2-21)$$

Laivan ja aallokon kohtaamiskulmataajuus ω_E voidaan laskea aallon nopeudesta, aallonpituudesta, laivan nopeudesta V sekä laivan ja aallokon kohtaamiskulmasta β (Kuva 7). Sekä aallon nopeus että aallon pituus riippuvat dispersioyhtälön mukaisesti aallokon taajuudesta. Kohtaamiskulmataajuus voidaan siten laskea seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$\omega_E = \omega \left(1 - \frac{\omega V}{g} \cos \beta \right), \quad (2-22)$$

jossa $\omega = 2\pi/T$, kun aallokon periodi T on annettu.



Kuva 7. Aallokon ja laivan kohtaamiskulman β määritelmä. Aallonpituus on λ , nopeus c_w , laivan etenemisnopeus on V .

2.2.2 Kohtaamiskulman muutoksen vaikutus kohtaamistaajuuteen.

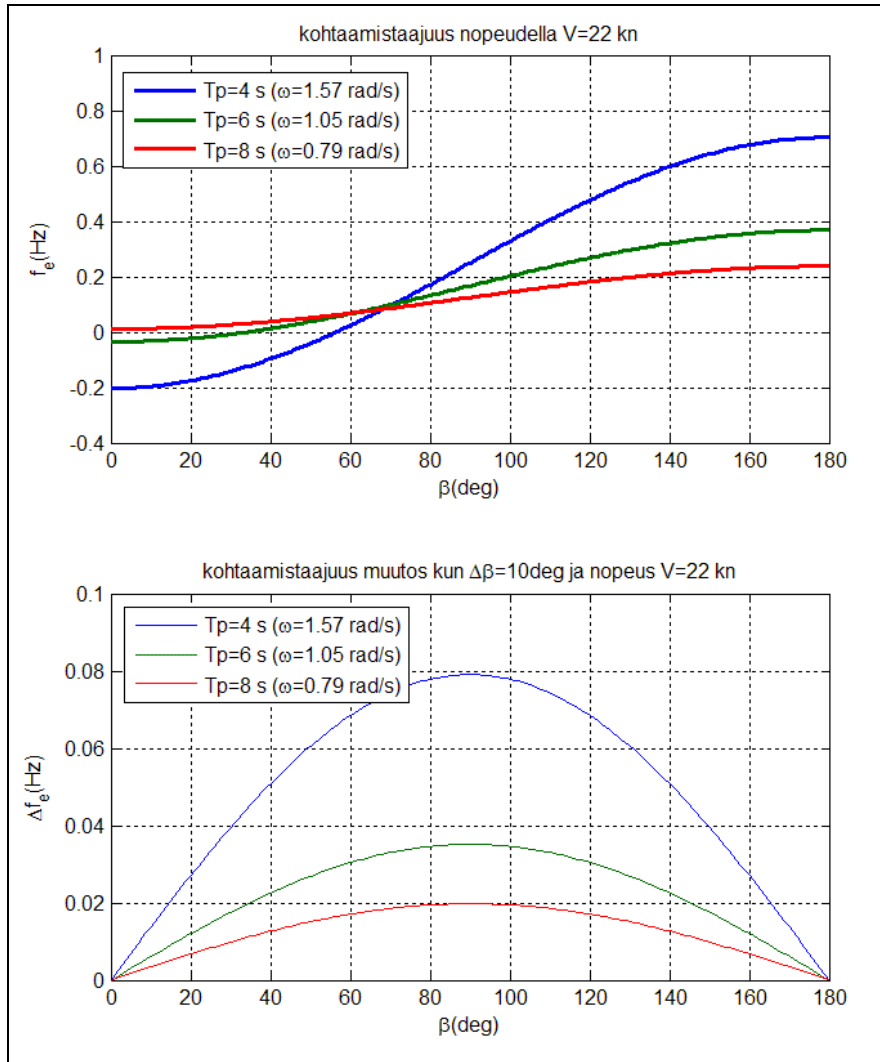
Laivan kulkiessa todellisissa meriolosuhteissa, kohtaamiskulma β ei ole tarkkaan määritelty, sillä tiedot aallokosta saadaan usein keskimääräisenä isolle alueelle aaltotutkilta. Kohtaamiskulman vaikutus kohtaamistaajuuteen riippuu lisäksi laivan nopeudesta V ja aallokon kulmataajuudesta ω . Vaikutus voidaan laskea derivoimalla ω_E yhtälöä β suhteen:

$$\frac{\partial \omega_E}{\partial \beta} = \frac{\omega^2 V}{g} \sin \beta . \quad (2-23)$$

Tällöin pieni kohtaamiskulman muutos $\Delta\beta$ aiheuttaa muutoksen $\Delta\omega_E$ kohtaamistaajuuteen:

$$\Delta\omega_E = \Delta\beta \frac{\partial \omega_E}{\partial \beta} = \Delta\beta \frac{\omega^2 V}{g} \sin \beta \quad (2-24)$$

Mitä pienempi on aallokon periodi T , sitä suuremman muutoksen kohtaamiskulman β muutos aiheuttaa kohtaamiskulmataajuuteen ω_E (Kuva 8). Kohtaamiskulman muutos aiheuttaa myös suuremman muutoksen kun aallokko on sivuaallokkoa. Vasta- tai myötääallokolla kohtaamiskulman muutoksen vaikutus on pienempi.



Kuva 8. Kohtaamiskulman vaikutus kohtaamistaajuuteen f_e kolmella eri aallokon periodilla T_p . Ylemmässä kuvassa kohtaamistaajuus kohtaamiskulman funktiona. Alemmassa kuvassa kohtaamistaajuuden muutos, kun kohtaamiskulma muuttuu 10 astetta, kohtaamiskulman funktiona.

2.2.3 Epäsäännöllinen aallokko

Todellinen aallokko sisältää useiden eripituisten aaltojen komponentteja. Edellä esitellyn aaltomallin lineaarisuuden johdosta on mahdollista esittää epäsäännöllinen aallokko säännöllisten aaltojen summana. Eri komponenttien osuutta kuvataan aaltospektrillä [11]. Aallokon spektri on energiaspektri ja se voidaan muodostaa Fourier-muuntamalla ajan funktiona oleva aallokon korkeus taajuustasoon.

Epäsäännöllisen aallokon parametreina käytetään usein kahta suuretta: merkitsevä aallonkorkeus H_S (significant wave height) ja aallokon modaaliperiodi T_0 , (merkitään

myös T_P peak period), joka saadaan spektrin huippuarvoa vastaavan taajuuden arvosta ω_0 :

$$T_P = \frac{2\pi}{\omega_0} . \quad (2-25)$$

Modaaliperiodia vastaavan taajuuden arvoa kutsutaan tästä eteenpäin aallokon modaalitaajuudeksi. Merkitsevä aallon korkeus on aallokon korkeimman kolmanneksen keskiarvo.

Spektriä kuvaavia parametreja ovat spektrin momentit. Spektristä lasketaan n :s momentti seuraavasti:

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n S(\omega) d\omega . \quad (2-26)$$

Aallokon varianssi m_0 on spektrin nollas momentti eli spektrin alle jäävä pinta-ala. Spektrin alle jäävä pinta-ala on verrannollinen aallokon kokonaisenergiaan neliömetrin kokoisella alueella:

$$E = \rho g m_0 . \quad (2-27)$$

Varianssista saadaan laskettua karakteristinen aallon korkeus H_1 seuraavasti:

$$H_1 = 4.00 \sqrt{m_0} . \quad (2-28)$$

Merkitsevä aallonkorkeus taas lasketaan varianssista:

$$H_s = 4.00 \sqrt{1 - \frac{\varepsilon^2}{2}} \sqrt{m_0} , \quad (2-29)$$

jossa ε on spektrin leveyden parametri (bandwidth parameter). Kapealle spektrille $\varepsilon=0$ ja leveälle spektrille $\varepsilon=1$. Usein kuitenkin merkitsevä aallonkorkeutena käytetään karakteristisesta aallonkorkeutta (2-28), sillä $H_1 \cong H_s$. Kapealle spektrille merkitsevä aallonkorkeus ja karakteristinen aallonkorkeus ovat samat. [10]

Keskimääräinen aaltojen jakso T_1 saadaan laskettua spektrin ensimmäisestä momentista:

$$T_1 = 2\pi \frac{m_0}{m_1} . \quad (2-30)$$

Aallokon piikkien periodi eli modaaliperiodin arvo voidaan myös laskea spektrimomenteista:

$$T_p = 2\pi \sqrt{\frac{m_2}{m_4}} . \quad (2-31)$$

ITTC:n suositus rajoitetulla merialueella käytettäväksi aaltospektri on niin sanottu JONSWAP-spektri $S_J(\omega)$. Merkitsevä aallonkorkeus H_s ja keskimääräinen aaltojen jakso T_1 ovat parametrit, jotka määrittelevät JONSWAP-spektrin [12]:

$$S_J(\omega) = 155 \frac{H_s^2}{T_1^4 \omega^5} \exp\left(\frac{-944}{T_1^4 \omega^4}\right) (3.3)^Y , \quad (2-32)$$

jossa

$$Y = \exp\left[-\left(\frac{0.191\omega T_1 - 1}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2\right] \quad (2-33)$$

ja

$$\begin{aligned} \sigma &= 0.07 \quad \text{kun} \quad \omega < 5.24/T_1 \\ \sigma &= 0.09 \quad \text{kun} \quad \omega > 5.24/T_1 \end{aligned} . \quad (2-34)$$

JONSWAP-spektrille on voimassa seuraava relaatio $T_1 = 0.834T_0$. Kuvassa 9 on sinisellä yhtenäisellä viivalla piirretty JONSWAP-spektri.

Usein käytetään myös Pierson-Moskowitz spektriä, jossa merkitsevä aallonkorkeus ja modaaliperiodi riippuvat tuulen nopeudesta. Tämä spektri on määritelty seuraavasti, kun tilanne on stationaarinen ja tuulialue (fetch) on rajoittamaton [13]:

$$S_J(\omega) = 0.0081 g^2 \frac{1}{\omega^5} \exp\left(-\frac{5}{4} \frac{\omega_p^4}{\omega^4}\right), \quad (2-35)$$

jossa

$$T_p = \frac{2\pi}{\omega_p} = 1.14 \frac{2\pi}{g} U_{19.5} \quad (2-36)$$

ja

$$H_s \cong 0.0213 U_{19.5}^2. \quad (2-37)$$

Keskimääräinen tuulen nopeus 19,5 metrin korkeudella meren pinnasta on $U_{19.5}$.

2.2.4 Laivan kohtaama aaltospektri

Edellä säännöllisen aallokon yhteydessä laskettiin laivan kohtaaman aallokon taajuus. Kun aallokko koostuu useista eripituisista aalloista, kuten on epäsäännöllisen aallokon tapauksessa, voidaan määrittää laivan kohtaama aaltospektri $S_E(\omega)$ aallokon spektristä. Laivan kohtaama aaltospektri on samanmuotoinen kuin aallokon spektri ainoastaan kohtaamistaajuus muuttuu. Aallokon energian tulee olla sama riippumatta tarkastelupisteestä, joten molempien spektrien alle jäävien pinta-alojen tulee olla samat, tällöin on oltava:

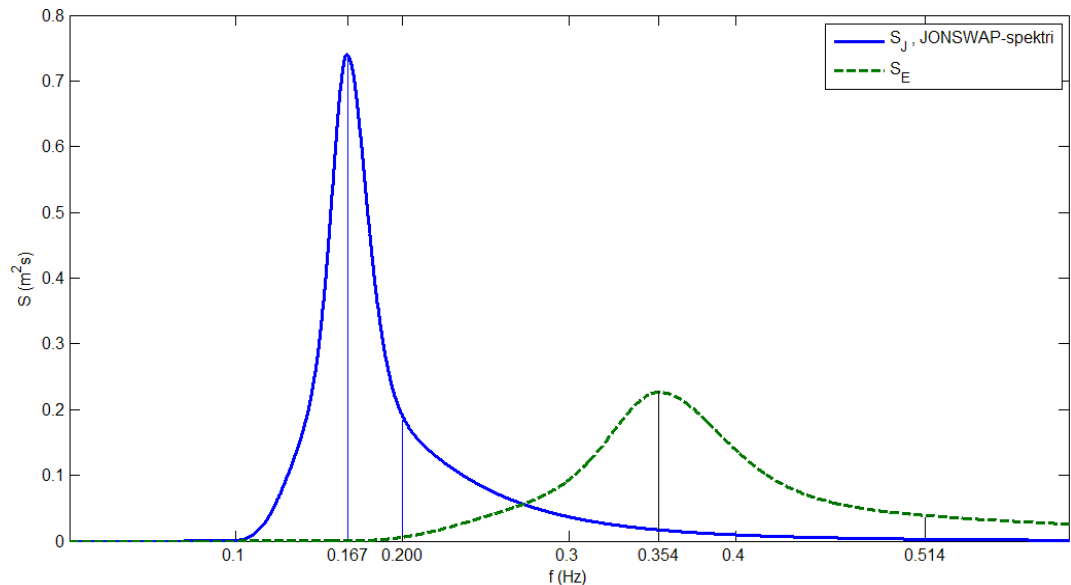
$$\begin{aligned} \int_0^\infty S(\omega_E) d\omega_E &= \int_0^\infty S(\omega) d\omega \\ S(\omega_E) d\omega_E &= S(\omega) d\omega \\ S(\omega_E) &= S(\omega) \frac{d\omega}{d\omega_E}. \end{aligned} \quad (2-38)$$

Derivoimalla kohtaamistaajuuden yhtälöä (2-22) taajuuden suhteen ja sijoittamalla se edelliseen yhtälöön, saadaan laivan kohtaama aaltospektri kohtaamistaajuuden funktiona:

$$S(\omega_E) = \frac{S(\omega)}{\left[1 - \frac{2V\omega}{g} \cos(\beta)\right]}, \quad (2-39)$$

jossa ω_E on kohtaamistaajuus yhtälön (2-22) mukaan. [14]

Kuvassa 9 on piirretty JONSWAP-spektri ja laivan kohtaama spektri. JONSWAP-spektrin keskimääräinen aallokon taajuus on 0,200 Hz ja modaalitaajuus eli korkeimpien aaltojen taajuus on 0,167 Hz. Kun tämä aaltospektri muunnetaan laivan kohtaamaksi aaltospektri, saadaan keskimääräiseksi aallokon taajuudeksi 0,514 Hz ja korkeimpien aaltojen taajuudeksi 0,354 Hz. Nämä taajuudet on merkitty kuvaan. Laivan kohtaaman aaltospektrin korkeimpien aaltojen taajuutta kutsutaan kohdatun aaltospektrin modaalitaajuudeksi tai lyhyemmin kohtaamistaajuuden modaalitaajuudeksi.



Kuva 9. JONSWAP-spektri, jonka $H_s=2$ m ja $T_1=5$ s, yhtenäinen sininen viiva. Laivan kohtaama spektri, kun $V=22$ solmua ja kohtaamiskulma $\beta=160$ astetta, vihreä katkoviiva.

Mallikokeissa aallokko tehdään aaltokoneella, jolla on mahdollista kerralla tehdä vain yhdensuuntaista aallokkoa. Todellisuudessa aaltospektri on aina hieman erilainen riippuen vallitsevista ja aiemmin vallinneista tuuliolosuhteista. Lisäksi todellinen aallokko sisältää usein myös eri suuntiin eteneviä aaltoja. Kokeita varten

määritellään sellainen aaltospektri, joka vastaa mahdollisimman hyvin todellista laivan operointitilannetta, jossa springing ilmiötä on havaittu tai oletetaan havaittavan. Tämän jälkeen aaltokoneella pyritään tuottamaan mahdollisimman hyvin halutunlainen määritelty spektri. Useimmiten tieto laivan operointiympäristön aallokosta saadaan aaltotutkilta, jotka antavat keskimääräisen aallokon suunnan, modaaliperiodin sekä merkitsevän aallonkorkeuden isolle alueelle. Tällöin ei saada tarkkaa tietoa laivan kohtaamasta aallokosta, jossa esim. springing värähtelyä on havaittu. Todellinen tieto laivan kohtaamista olosuhteista voidaan saavuttaa mittaamalla aallokkoa laivalla.

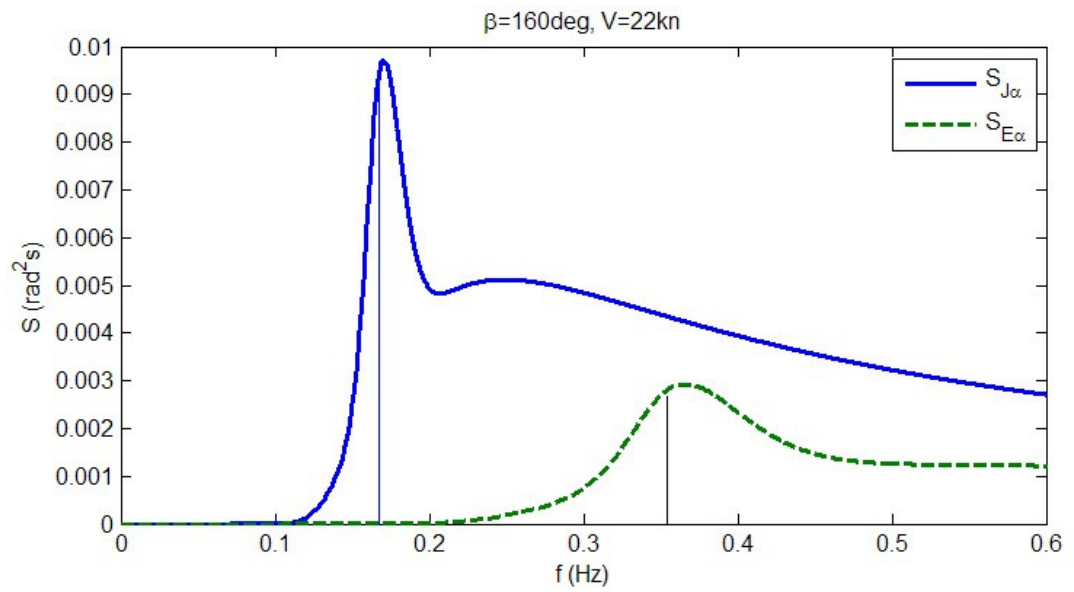
2.2.5 Epäsäännöllisen aallokon jyrkkyyden spektri

Säännöllisen aallokon jyrkkyyden amplitudi syvässä vedessä on $\alpha = \omega^2 A_w / g$, yhtälö (2-20). Edellä on muodostettu epäsäännölliselle aallokolle aallon korkeuden spektri. Aallokon spektristä voidaan laskea aallon korkeus tietyllä taajuudella. Sijoittamalla tämä aallon korkeus yhtälöön (2-20) saadaan aallokon jyrkkyyden spektri [10]:

$$S_\alpha(\omega) = \frac{\omega^4}{g^2} S(\omega) . \quad (2-40)$$

Epäsäännöllisen aallokon jyrkkyyden spektri saadaan siis kertomalla aallonkorkeuden spektri (ω^4/g^2) :lla. Kuvassa 10 on JONSWAP-spektrin aallokon jyrkkyyden spektri sekä laivan kohtaaman aallokon jyrkkyyden spektri.

Aallokon jyrkkyyden spektrin arvot ovat kohdatun aallokon osalta pienempiä kuin varsinaisen aallokon spektrissä, koska alle spektrien alle jäävien alojen täytyy olla samat. Laivan kohtaaman aallokon jyrkkyys on silti sama kuin varsinaisen aallokon jyrkkyys. Kuvaan on merkitty modaalitaajuuksien kohdalle pystyviiva. Jyrkimmät aallot ovat hieman modaalitaajuutta suuremmilla taajuuksilla.



Kuva 10. Aallon jyrkkyyden spektri JONSWAP-spektrille jonka $H_s=2$ m ja $T_1=5$ s, sekä nopeudella 22 solmua kohtaamiskulmalla 160 astetta etenevälle laivalle.

3 Mallikokeet

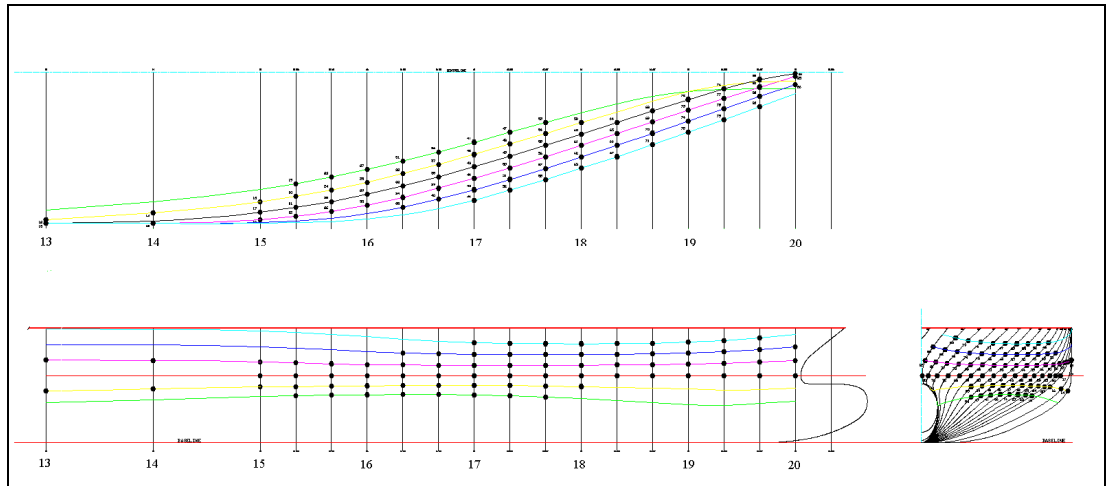
Mallikokeet suoritettiin risteilijäaluksen mallille Marin'n mallikoelaitoksella Hollannissa. Koealtaan koko on 170×40 metriä ja se on 5 metriä syvä. Altaan kahdella vierekkäisellä reunalla on aaltokoneet. Molempien reunojen aaltokoneet ovat jaettu 60 senttimetrin levyisiin alareunastaan nivellettyihin levyihin, jotka liikkuvat yläreunastaan edestakaisin puskien aallon liikkeelle. Jokainen levy toimii itsenäisesti omalla moottorillaan. Aaltokoneiden vastakkaisilla reunoilla on aallon heijastumista estävä ranta, johon aalto murtuu ja menettää energiansa. Poikittain altaan yli kulkee silta, joka liikkuu altaan pituussuunnassa maksimissaan 6 m/s nopeudella. Sillassa on vaunu, joka liikkuu sillan alla altaan poikittaissuunnassa maksimissaan 4 m/s nopeudella. Mallia voidaan ajaa vapaasti sen omilla propulsoreilla ja seurata vaunulla. [15]

Mallikokeilla mitattiin paine useista pisteistä laivan rungolla keulan alueelta. Paine mitattiin jokaiselle pisteelle samanaikaisesti tietyillä ajan hetkillä. Mittaustaajuus määrää ajanhetkien välin. Mittaustaajuus pyritään saamaan mahdollisen suureksi, jotta saadaan mahdollisimman aikajatkuva painematriisi. Mittaustaajuutta rajoittaa mittauslaitteiston ja mittausohjelman kyky näytteistää useita kanavia kerrallaan. Lisäksi mittautulosten talletuskapasiteetti saattaa rajoittaa mittaustaajuutta.

Paineantureita oli keulan alueella 75 kpl ja suhteellisen liikkeen antureita 5 kpl. Paineanturit sekä suhteellisen liikkeen anturit sijaitsivat laivan styyrpuurin puolella. Toiselta kyljeltä ei mitattu painetta eikä suhteellisia liikkeitä. Lisäksi oli mitattu laivan 6 liikekomponenttia eli liikkeet kaikkiin koordinaattisuuntiin sekä kulmaliikkeet koordinaattiakseleiden ympäri.

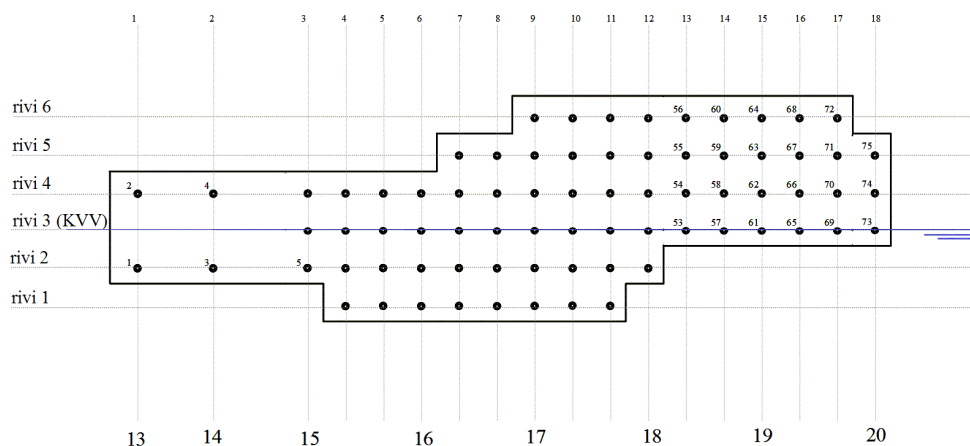
3.1 Mallin tiedot ja antureiden sijainnit

Malli oli varusteltu propulsiolaitteilla, joilla sen nopeus ja suunta pidettiin haluttuna. Mallia ajettiin sen omilla propulsiolaitteilla eikä sen liikettä siten rajoitettu mihinkään suuntaan. Malli oli painotettu todellisen painojakauman mukaisesti, jolloin sen liikkeet vastaavat myös todellisen laivan liikkeitä. Mallin keulan runkomuoto ja antureiden sijoituskohdat ovat esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Mallin keulan runkomuoto. Kaarinumerointi merkitty kuvaan.

Paineantureita oli asennettu kuudelle eri korkeudella sijaitsevalle viivalle. Viivat eivät olleet korkeuden z suhteen vakiokorkeudella (Kuva 11). Ainoastaan konstruktiovesiviivalla sijaitsevat anturit sijaitsevat konstruktiovesiviivan korkeudella. Kuva 12 havainnollistaa kaarten sekä antureiden numerointia. Kuva ei ole mittakaavassa. Pituussuunnassa antureiden sijoittelu oli jaettu 18 poikkileikkaukseen, joista puhutaan tässä kaarina. Pituussuuntaisen sijainnin kertoo konstruktiokaarten numerointi (Kuva 12). Lisäksi pituussuuntaiset sijainnit on numeroitu 1-18 lähtien takimmaisesta kaaresta (kaari 13), jolle on asennettu antureita. Pystysuuntaisen sijainnin kertoo rivinnumero. Kaarilla on eri määrä antureita. Kaarilla 17, 17.3 ja 17.6 on kuusi anturia jokaisella. Kun taas takimmaisilla kaarilla 13 ja 14 on vain kaksi anturia kullakin.



Kuva 12. Antureiden numerointi. Alareunassa konstruktiokaarien numerot, yläreunassa juokseva numerointi pituussuuntaiselle sijainnille. Huom. tässä kuvassa antureiden korkeussuuntaiset sijainnit eivät ole mittakaavassa.

Keulan alueen viisi suhteellisen liikkeen anturia olivat resistiivisiä johdinlankapareja, jotka oli asennettu lähelle runkoa, konstruktiokaarisijainneille 15.7, 16.7, 17.7, 18.7 ja 20.

3.2 Tehdyt mittaukset

Mallia ajettiin useissa eri epäsäännöllisen aallokon tilanteissa. Epäsäännöllistä aallokkoa tehtiin altaan sivulla olevalla aaltokoneella. Aallokko oli yhdensuuntaista epäsäännöllistä aallokkoa, jolla oli määrätty merkitsevä aallonkorkeus H_S sekä modaaliperiodi T_P . Muodostetun epäsäännöllisen aallokon spektri oli Pierson-Moskowitz-spektrin muotoinen. Mallia ajettiin eri kohtauskulmilla aallokon etenemissuuntaan nähden. Kaikki suureet ovat laivamittakaavassa, myös mitatut suureet on skaalattu laivamittakaavaan. Kokeita oli ajettu epäsäännöllisen aallokon merkitsevillä aallonkorkeuksilla 1.4 m, 2 m, 2.8 m, 3.4 m ja 3.9 m, kohtaamiskulmilla 180 deg (vasta-aallokko), 160 deg, 140 deg ja 120 deg. Sivuvastaisessa aallokossa aallokko kohtaa laivan styyrpuurin puolelta, juuri tältä puolelta mitataan paine. Kaikissa ajoissa nopeus oli 22 solmua. Jokaiselle eri aallonkorkeuden ja kohtaamiskulman yhdistelmälle on ajettu kahdesta viiteen ajoa. Yhden mittausajon kesto oli noin 200 sekuntia. Paineantureiden näytteistystaajuus skaalattuna laivamittakaavaan on 1,004 kHz. Näytteiden lukumäärä yhdeltä mittausajolta per paineanturi on tällöin noin 200 000.

4 Paineen aiheuttaman voiman laskenta

Mitatun painetallenteen perusteella muodostetaan painejakauma laivan rungolle mittauspisteiden väliselle alueelle. Painejakauma muodostetaan jokaisella mitatulla ajan hetkellä erikseen. Kun painejakauma rungolle on saatu muodostettua, voidaan integroida paine kaaren pituuden yli viivakuormaksi. Viivakuormaa voidaan jälleen integroida halutun pituuden yli, jolloin saadaan kyseisellä alueella vaikuttava kokonaisvoima.

Käytännössä paineen integrointi toteutetaan numeerisesti siten, että voima lasketaan tietyissä laskentapisteiden muodostamassa hilassa. Runko on jaettu hilan muodostamiin nelikulmioihin, joiden keskipisteisiin interpoloidaan paine mittauspisteistä. Nelikulmioiden projisoidut alat jokaisen koordinaattiakselin suuntaan on laskettu. Tällöin paineen nelikulmioon kohdistaman voiman komponentit saadaan laskettua kertomalla projisoitu ala paineen arvolla nelikulmion keskipisteessä.

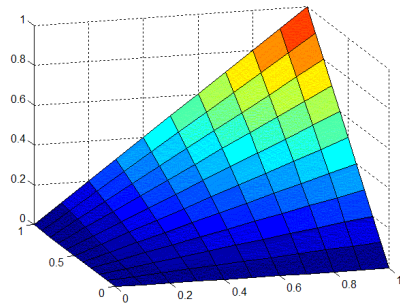
Paineen arvot ovat mitattu keulan alueelta vain toiselta puolelta rajoitetulta alueelta (Kuva 11). Viivakuorma, joka lasketaan ei siten ole koko laivaan vaikuttava viivakuorma, vaan ainoastaan viivakuorma mittausalueelta. Samoin kokonaisvoima on ainoastaan kokonaisvoima rajoitetulta alueelta.

4.1 Paineen interpolointi

Laivan runkoon vaikuttavan voiman laskennan tarkkuus riippuu paineen interpoloinnin tarkkuudesta. Paine voidaan interpoloida mittauspisteiden välille monella tavalla. Bilineaarinen interpolointi tarkoittaa sitä, että painejakauma rungolla on jatkuva mutta sen derivaatta ei ole jatkuva. Kun tiedetään neljän pisteen paineen arvot, lasketaan niiden välissä oleva arvo seuraavasti [16]:

$$\begin{aligned} p(x, z) = & p_1 \frac{1}{\Delta x \Delta z} (x_{\max} - x)(z_{\max} - z) \\ & + p_2 \frac{1}{\Delta x \Delta z} (x - x_{\min})(z_{\max} - z) \\ & + p_3 \frac{1}{\Delta x \Delta z} (x_{\max} - x)(z - z_{\min}) \\ & + p_4 \frac{1}{\Delta x \Delta z} (x - x_{\min})(z - z_{\min}) \quad . \end{aligned} \tag{4-1}$$

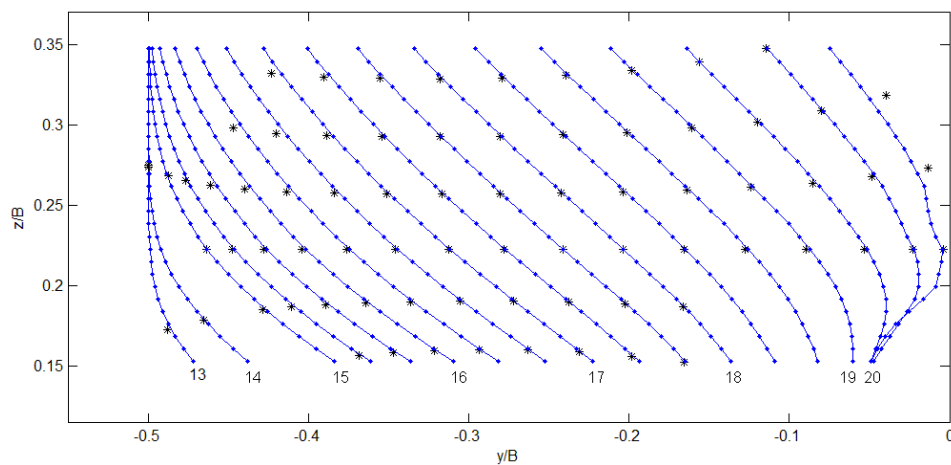
Yhtälössä (4-1) x ja z ovat sijainnin koordinaatit, Δx ja Δz ovat nelikulmion sivujen pituudet ja p_i on paine kulmassa i . Kuvassa 13 on bilineaarisen interpoloinnin tuottama paineen approksimaatio neliön muotoisessa alueessa $x=(0,1)$ ja $z=(0,1)$, kun kaikissa muissa kulmapisteissä arvot ovat nolla paitsi kulmassa $(x,z)=(1,1)$, jossa $p=1$.



Kuva 13. Bilineaarisen interpoloinnin jakauma alueessa $[0,1;0,1]$

Rungon pinta on jaettu laskentahilaan, joka koostuu nelikulmioista. Rungon vesiviivat ja poikkipintakaaret muodostavat hilan. Paine interpoloidaan nelikulmioiden keskipisteisiin, joita kutsutaan tässä paineen laskentapisteiksi.

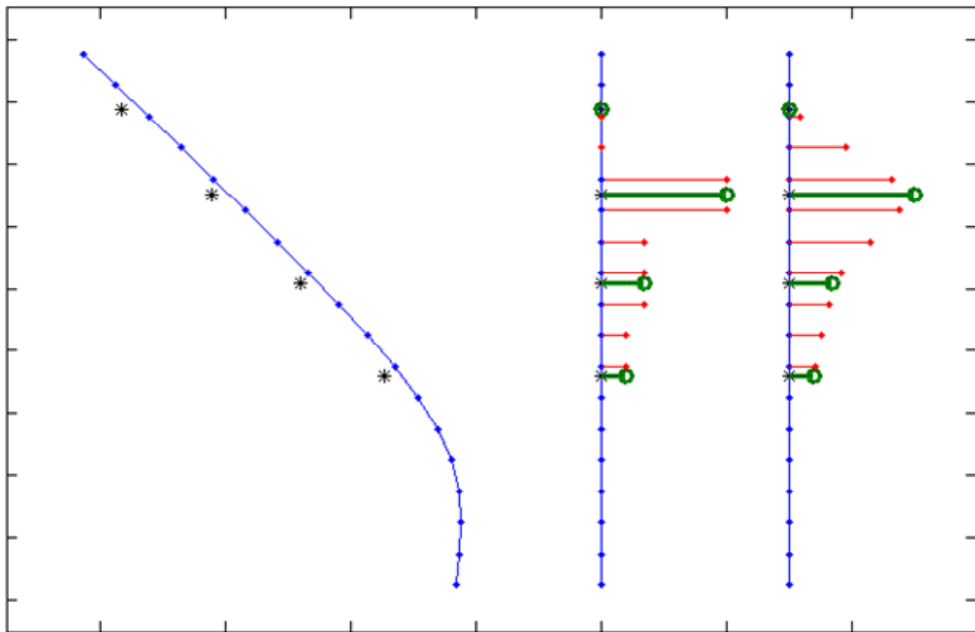
Antureiden arvojen interpolointi rungolle suoritetaan ensin jokaiselle kaarelle, jossa on antureita. Laskentapisteet eivät sijaitse täysin samalla x -suuntaisella etäisyydellä kuin anturit. Joten paine interpoloidaan kaarelle, joka sijaisee x -suunnassa lähinnä kaarta, joilla anturit sijaitsevat. Kuvassa 14 on esitetty anturit ja laskentapisteet kaarilla. Kuvasta puuttuu selvyiden vuoksi kaarten väliset laskentapisteet.



Kuva 14. Kaaret, joilla antureita. Anturit merkitty mustalla tähdellä, kaarten laskentapisteet merkitty sinisellä pisteellä. Kaarten alareunassa kaarinumerointi.

4.1.1 Esimerkki interpoloinnista kaarelle

Interpolointi kaarella tehdään kaarta lähimpänä olevalle laskentapisteiden muodostamalle kaarelle. Kuvassa 15 on oikeassa laidassa esitetty interpolointi käyttäen kahta eri menetelmää, lähimmän anturin arvoa ja lineaarista interpolointia. Laskentapisteet ja antureiden sijainnit z suuntaisella viivalla, antureiden mitaamat paineet on merkitty paksummalla viivalla ja interpoloidut paineet laskentapisteissä punaisella ohuemalla viivalla. Laskentapisteet, jotka sijaitsevat antureiden ylä- tai alapuolella saavat arvoksi nollan.

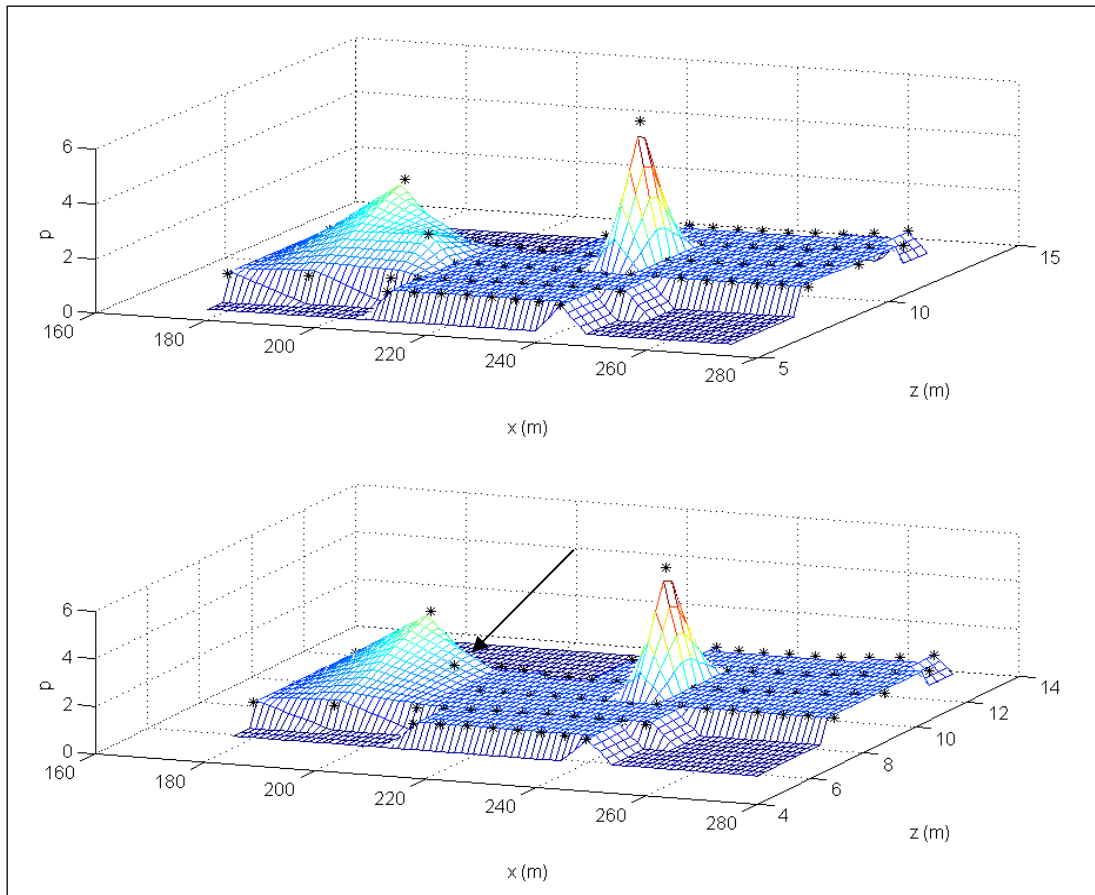


Kuva 15. Kaaren 19 anturit ja sitä lähimmät pystysarakkeen laskentapisteet.

Kun paine on interpoloitu laskentapisteisiin kaarille, joilla anturit sijaitsevat, voidaan tämän jälkeen paine interpoloida näiden kaarten välillä sijaitseville laskentapisteille. Laskentapisteet muodostavat vesiviivat, joita pitkin paine voidaan interpoloida lineaarisesti. Tämä interpolointi muodostaa kuvan 16 painejakauman. Kuvassa interpolointialue, keulan pinta, on projisoitu xz tasoon.

Interpolointi toteutetaan käytännössä siten, että jokaiselle anturille lasketaan aluksi interpolointifunktio. Interpolointifunktio on vektori, jossa on yhtä monta alkioita kuin laskentahilassa on laskentapisteitä. Anturin j interpolointivektori on $\{c\}_j^{1 \times M}$, kun laskentahilassa on M laskentapistettä. Kertomalla anturin j mitaaman paineen arvo

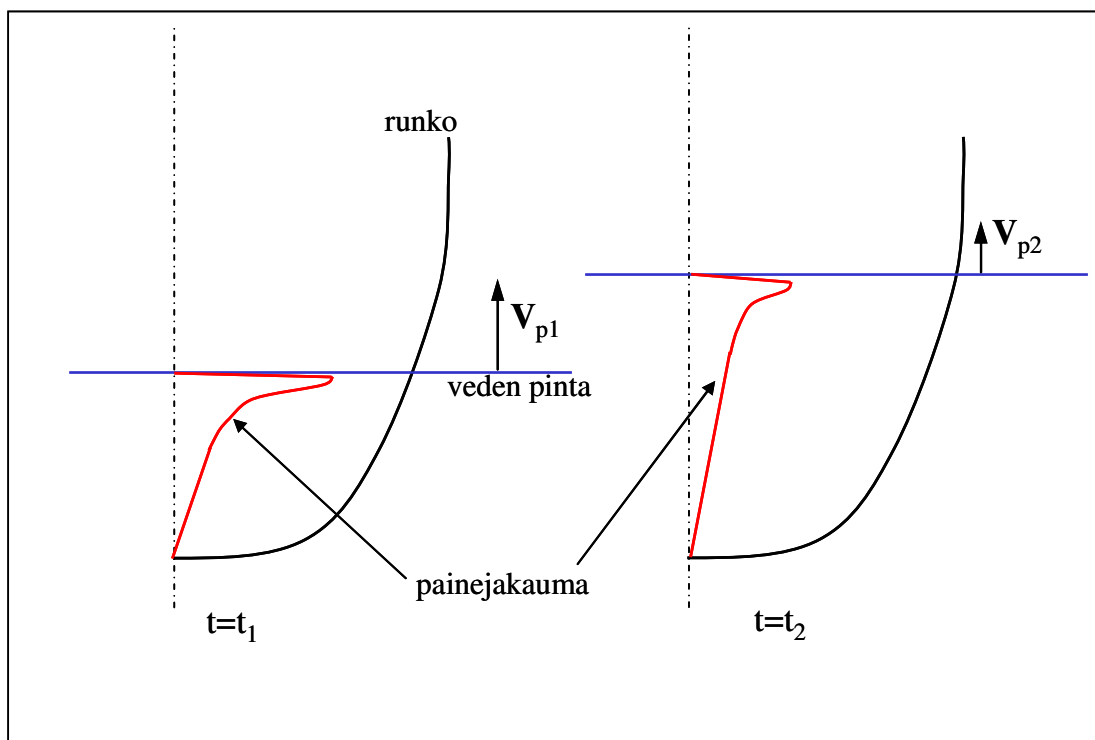
P_j interpolointifunktiolla, saadaan kyseisen anturin antama painejakauma $\{p\}_j^{1 \times M}$ koko laskentahilassa $\{p\}_j^{1 \times M} = P_j \{c\}_j^{1 \times M}$. Kaikkien 75 anturin antama painejakauma saadaan summaamalla jokaisen anturin osuudet painejakaumaan. Kerrotaan paineiden arvot sisältävä vektori $\{P\}^{1 \times 75}$ interpolaatiofunktioit sisältävällä matriisilla $[c]^{75 \times M}$, jolloin kaikkien paineantureiden antama jakauma on $\{p\}^{1 \times M} = \{P\}^{1 \times 75} [c]^{75 \times M}$. Tässä oli esitetty yhden ajanhetken interpolointi. Mittaustuloksena on paine jokaiselta anturilta näytteistystaajuuden määräämillä ajanhetkillä, joten mittaustulos on $N \times M$ kokoinen matriisi, jossa N on näytteiden lukumäärä. Tällöin paine interpoloituina kaikilla ajanhetkillä laskentapisteille on $\{p\}^{N \times M} = \{P\}^{N \times 75} [c]^{75 \times M}$. Tällä tavalla toteutettuna interpolointi koko mittausjakson ajalle on yksi iso matriisikertolasku, josta tietokone selviää nopeasti vaikka näytteiden lukumäärä olisikin suuri.



Kuva 16. Esimerkki bilineaarisen interpoloinnin tuottamasta jakaumasta. Ylemmässä kuvassa on samat antureiden paineet kuin alemmassa, mutta alemmassa on jätetty nuolen osoittama anturi huomioimatta.

4.1.2 Paineen interpoloinnin ongelmat

Painejakaumassa saattaa olla veden pinnan tuntumassa kapea painepiikki veden pinnan noustessa rungon suhteen (Kuva 17). Jos tämä painepiikki on kapeampi kuin antureiden välinen etäisyys, se häviää interpoloitaessa painetta antureiden väliselle alueelle.

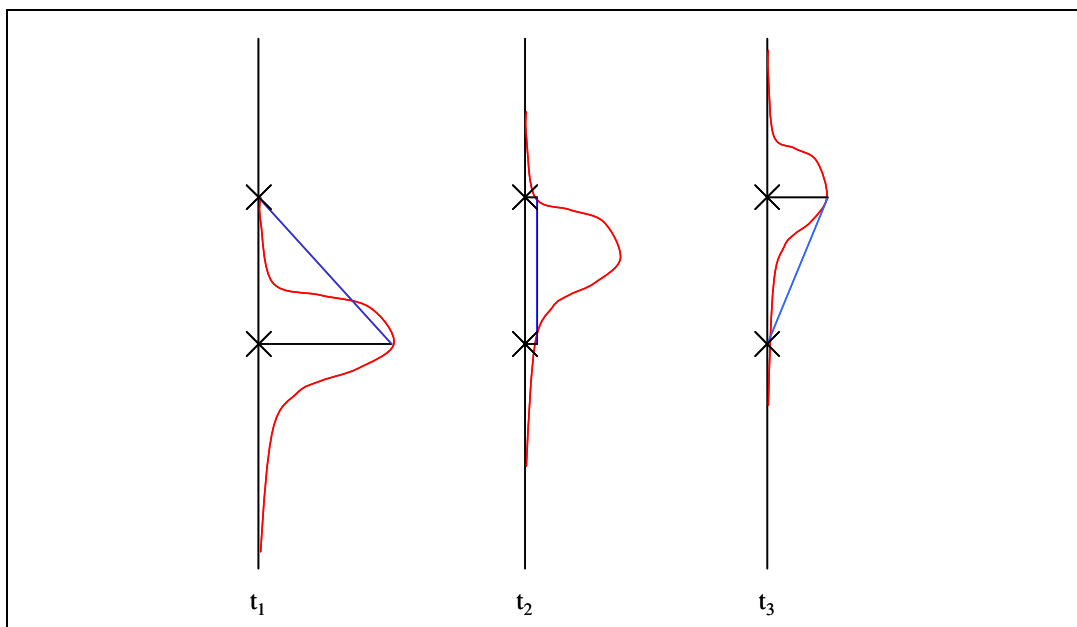


Kuva 17. Mahdollinen painejakauma aallon noustessa kaarella, ajan hetkillä t_1 ja t_2 (kun $t_1 < t_2$). Veden pinnan suhteellinen nousunopeus v_{p1} ajan hetkellä t_1 on suurempi kuin suhteellinen nousunopeus v_{p2} ajan hetkellä t_2 .

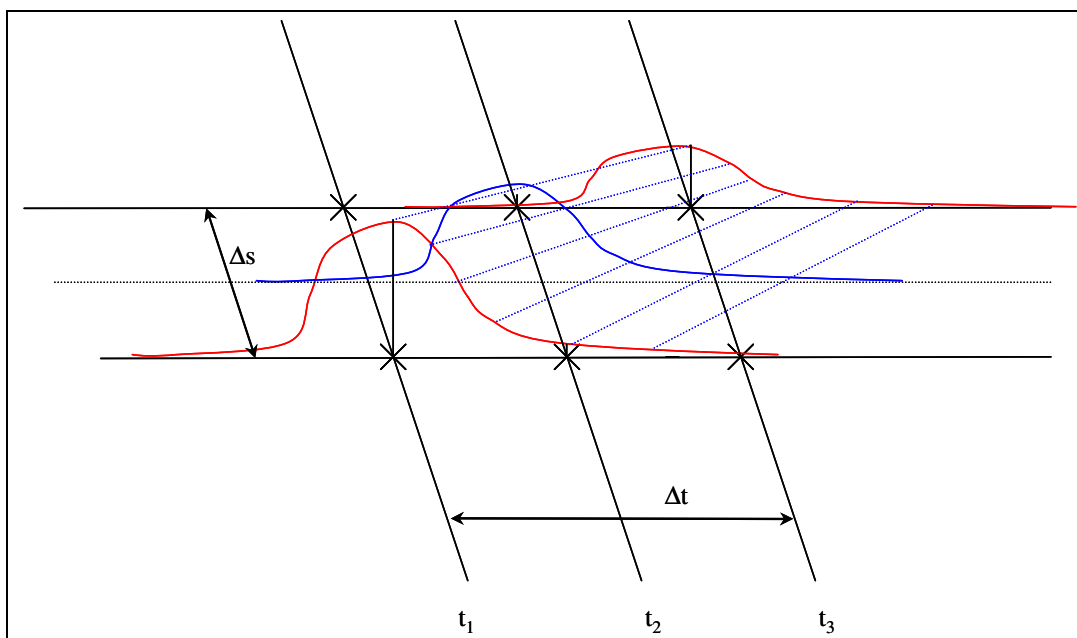
Kuvassa 18 on esitetty painejakauma, jossa on antureiden väliä kapeampi piikki. Kuvissa 18 on painejakauma piirretty kolmella eri ajan hetkellä, painejakauman piikin liikkuessa ylöspäin kahden anturin ohi. Kuvaan on myös piirretty lineaarisesti interpoloitu jakauma antureiden välillä. Lineaarinen painejakauma antaa ajan hetkellä t_2 liian pienen jakauman antureiden välille.

Vaihtoehtoinen interpolointitapa voisi olla sellainen, jossa aikatazon signaalista etsittäisiin ajan hetket t_1 , jolloin piikki ohittaa alemman anturin ja t_3 , jolloin piikki ohittaa ylemmän anturin. Ylemmän anturin näytettä siirrettäisiin eteenpäin erotuksen $\Delta t = t_3 - t_1$ verran (Kuva 19). Tämän jälkeen interpoloitaisiin lineaarisesti antureiden

välillä. Interpoloinnin jälkeen jälleen siirrettäisiin näyte antureiden välillä taaksepäin suhteessa $\Delta t(s) = \Delta t * s / \Delta s$, jossa s on pystysuuntainen koordinaatti antureiden välillä alemmasta anturista ylem্পään ja Δs etäisyys antureiden välillä.



Kuva 18. Mahdollinen todellinen painejakauma punaisella ja lineaarisesti interpoloitu painejakauma sinisellä.



Kuva 19. Paineen arvot aikatasossa kahdella anturilla (punaiset käyrät), sekä paine aikatasossa interpoloituna näiden välille (sininen).

Kuitenkin käytännössä tämä vaihtoehtoinen interpolointikeino on hankala toteuttaa. Piikkien etsintä onnistuisi hakemalla maksimi tai derivaatan maksimi tai nämä molemmat yhdessä. Kohtaamisperiodin pituiselle ajanjaksolle saisi mahtua vain yksi piikki. Epäsäännöllisen aallokon tapauksessa tästä tulee hieman monimutkaisempaa, koska periodi on vain keskimääräinen periodi. Epäsäännöllisessä aallokossa jokaisen piikin välinen aika eroaa kohtaamisperiodista, jolloin näytettä on siirrettävä eri ajan Δt verran jokaisen piikin kohdalla, tällöin tulee siirrettyyn näytteeseen sekä päällekkäisyyksiä että aukkoja.

Antureiden väliä kapeampi painepiikki on vain oletus, lisäksi kuvissa 18 ja 19 on tämä esitetty liioitellusti. Paineanturin signaalissa saattaa olla ajallisesti kapeita piikkejä, mutta tämä ei vielä tarkoita, että painepiikki olisi rungon pinnalla kapea. Jos aikatasossa kapea painepiikki osuu samanaikaisesti useille antureille, se ei ole tällöin rungon kaarella kapea eikä siitä tällöin myöskään aiheudu suurta virhettä interpolointiin.

4.2 Paineen integrointi voimaksi

Edellä esitettiin, kuinka paine interpoloidaan kaarille ja sitten kaarten välille laskentapisteisiin. Tämän jälkeen voidaan paineen aiheuttama voima laskea kertomalla se normaalivektorilla ja kyseisen pisteen alalla, tällöin saadaan voima ja sen suunta:

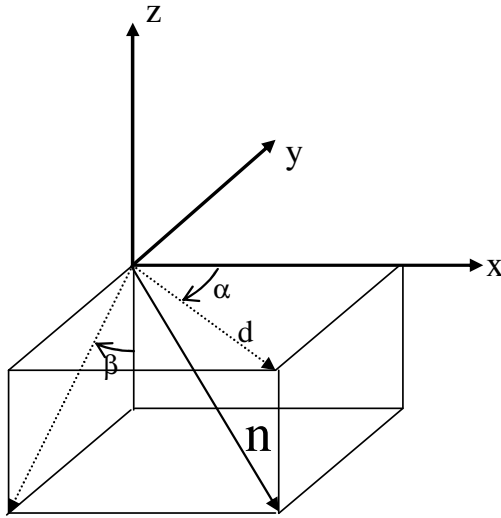
$$\begin{aligned}\vec{F} &= pA\vec{n} \\ &= pA[n_x\vec{i} + n_y\vec{j} + n_z\vec{k}] \quad .\end{aligned}\tag{4-2}$$

Voimavektori saadaan myös kertomalla paine projisoidulla aloilla:

$$\vec{F} = p[A_x\vec{i} + A_y\vec{j} + A_z\vec{k}],\tag{4-3}$$

jossa $A_x=A n_x$, $A_y=A n_y$ ja $A_z=A n_z$ ovat projisoidut alat. Projisoidut alat voidaan laskea kertomalla ala normaalivektorin komponenteilla. Laskentahilan nelikulmiolle nämä alat voidaan laskea suoraan ilman normaalivektoria käyttämällä nelikulmion kulmien koordinaatteja.

Laivan kyljen pinnan suunnasta saadaan NAPA-ohjelman mallista kulmat α ja β .
Vesiviivan kulma on α -kulma ja kaarikulma on β -kulma.



Kuva 20. Pinnan normaalivektoreiden kulmien määrittäminen.

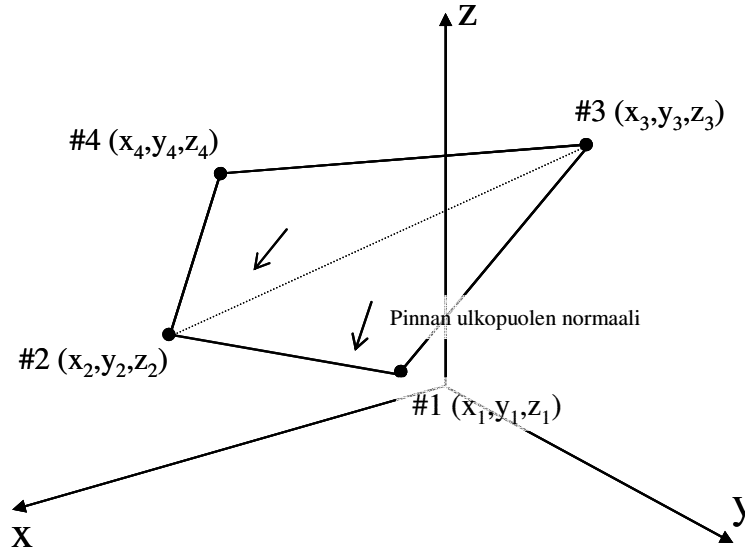
Pinnan normaalin x, y ja z -suuntaiset komponentit kulmien α ja β funktiona ovat:

$$\begin{aligned} n_x &= \cos(\alpha) \sin(\beta) \frac{1}{\sqrt{\sin^2(\beta) + \sin^2(\alpha) \cos^2(\beta)}} \\ n_y &= -\sin(\alpha) \sin(\beta) \frac{1}{\sqrt{\sin^2(\beta) + \sin^2(\alpha) \cos^2(\beta)}} \\ n_z &= -\sin(\alpha) \cos(\beta) \frac{1}{\sqrt{\sin^2(\beta) + \sin^2(\alpha) \cos^2(\beta)}} \end{aligned} \quad (4-4 \text{ a-c})$$

Yhtälöiden (4-4 a-c) johto on esitetty liitteessä A.

4.2.1 Projisoidun alan laskenta

Jaetaan laskentahilan nelikulmio aluksi kahdeksi kolmioksi (Kuva 21), koska kolme pistettä muodostaa tason. Näiden kahden kolmion alat lasketaan ja summataan yhteen nelikulmion alaksi.



Kuva 21. Laskentahilan nelikulmion kulmien numerointi ja ulkonormaalien suunta.

Kun nelikulmion kulmissa käytetään kuvan 21 numerointia ja nelikulmio jaetaan kolmioihin diagonaalilla kulmasta #2 kulmaan #4, kolmioiden projisoidut alat voidaan laskea yhtälöiden (4-5 a-c) mukaan. Ylemmän kolmion z-suunnan projisoidun alan yhtälö on kirjoitettu kokonaisuudessa auki. Kolmioiden alojen positiivinen suunta on määritelty siten, että se osoittaa kuvan 21 pinnan ulkopuolen normaalin suuntaan. Koko nelikulmion projisoitu ala on $A = A_{lower} + A_{upper}$:

$$A_{x,lower} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} y_1 & z_1 & 1 \\ y_2 & z_2 & 1 \\ y_3 & z_3 & 1 \end{vmatrix} \quad A_{x,upper} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} y_2 & z_2 & 1 \\ y_4 & z_4 & 1 \\ y_3 & z_3 & 1 \end{vmatrix} \quad (4-5 \text{ a})$$

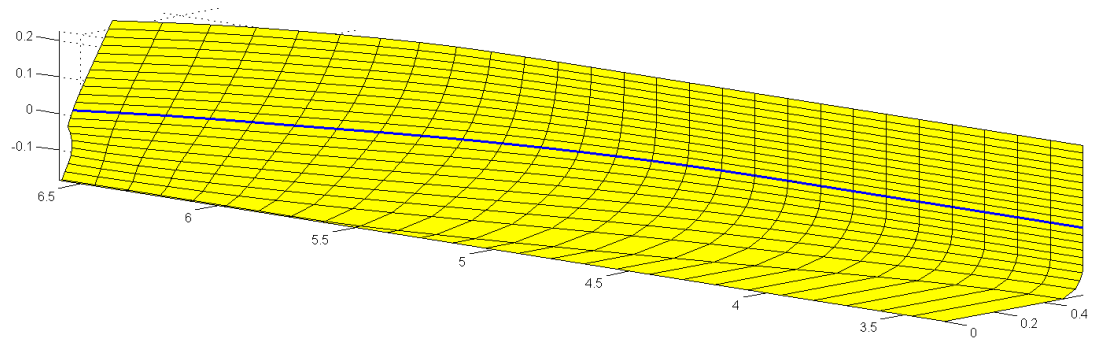
$$A_{y,lower} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} x_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & z_2 & 1 \\ x_3 & z_3 & 1 \end{vmatrix} \quad A_{y,upper} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} x_2 & z_2 & 1 \\ x_4 & z_4 & 1 \\ x_3 & z_3 & 1 \end{vmatrix} \quad (4-6 \text{ b})$$

$$A_{z,lower} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix} = \frac{1}{2} (-x_2 y_1 + x_3 y_1 + x_1 y_2 - x_3 y_2 - x_1 y_3 + x_2 y_3) \quad (4-7 \text{ c})$$

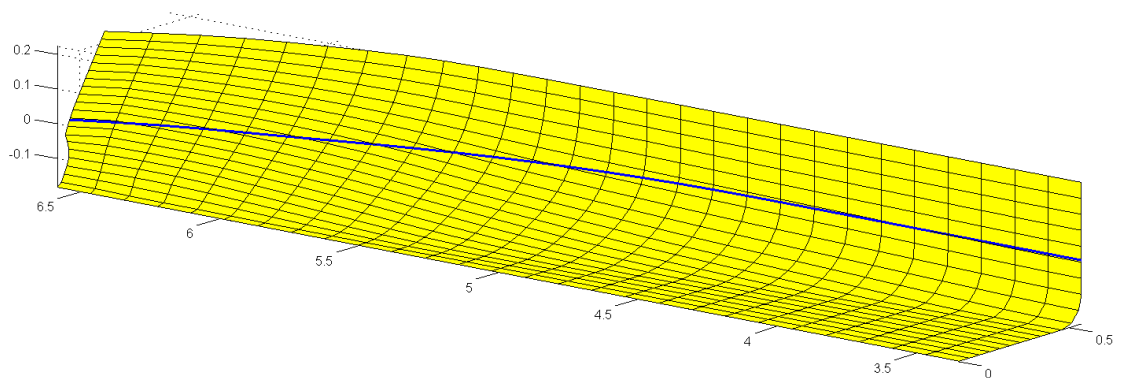
$$A_{z,upper} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} x_2 & y_2 & 1 \\ x_4 & y_4 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix}.$$

4.2.2 Voiman laskentamenetelmän verifiointi

Laskentamenetelmää testattiin erään laivanrungon keulaosalle antamalla jokaiseen laskentapisteesen hydrostaattinen paine ja laskemalla tämän paineen aiheuttama z-suuntainen voimajakauma. Saatua jakaumaa verrattiin saman rungon *NAPA* ohjelmasta saatuun nostejakaumaan. Menetelmän verifiointissa käytettiin kahta laskentahilaa. Ensimmäisen laskentahilan ”loft-hilan” muodostavat rungon poikkileikkaukset eli kaaret ja vaakatason pitkittäiset leikkaukset eli vesiviivat (Kuva 22). Toisen laskentahilan ”paneeli-hilan” taas muodostavat rungon poikkileikkaukset ja poikkileikkauksille tasavälein jaetut pisteet (Kuva 23).

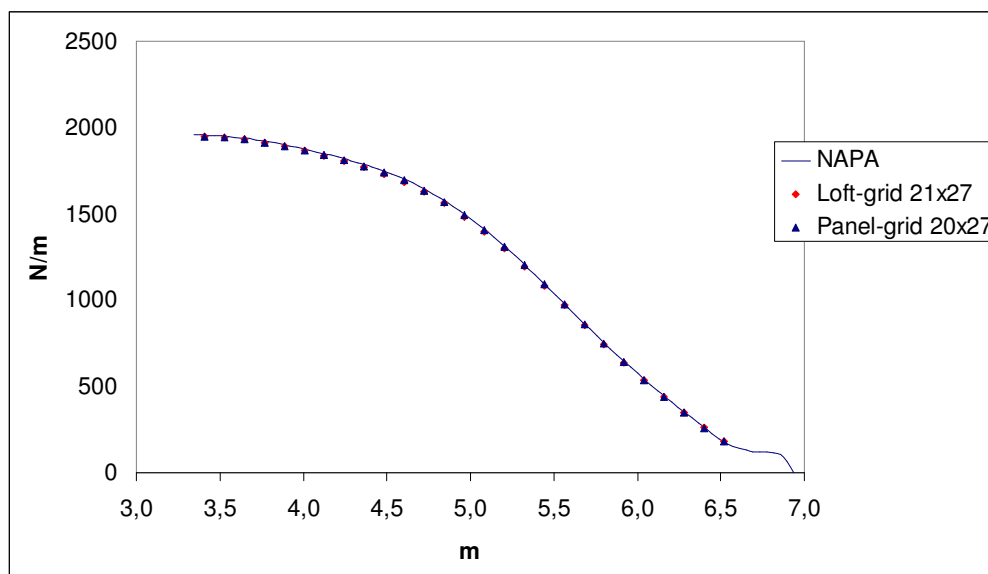


Kuva 22. Loft laskentahila 21x27 laskentapistettä. Konstruktiio vesiviiva on piirretty runkoon sinisellä.



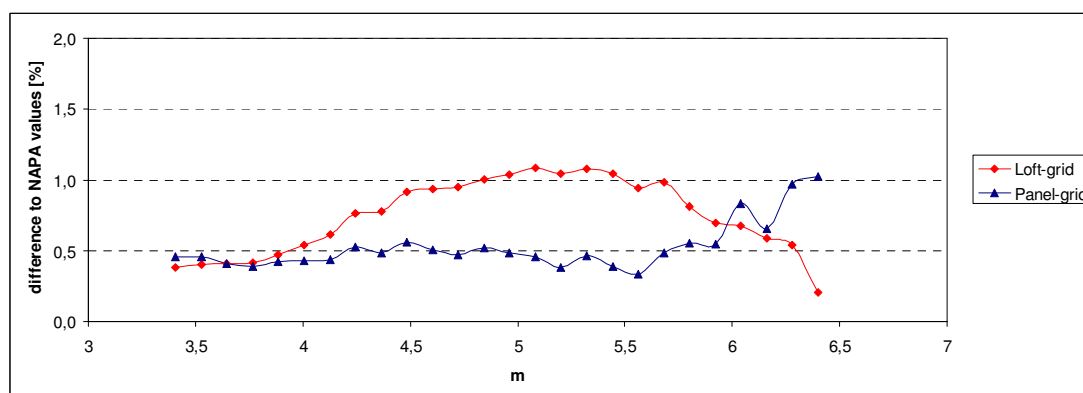
Kuva 23. Paneeli laskentahila 20x27 laskentapistettä. Kuvassa konstruktiovesiviiva sinisellä.

Kuvaan 24 on piirretty *NAPA* ohjelmasta saatu nostejakauma keulan alueella sekä jakauma laskettuna loft- ja paneeli-hilalla.



Kuva 24. Nostejakaumat keulan alueella, *NAPA*-ohjelman mukaan sekä loft- ja paneeli-hilalla laskettuna.

Kuvassa 25 on vertailtu loft- ja paneeli-hilalla laskettuja nostejakaumia *NAPA*-ohjelman antamaan jakaumaan. Kuvaan on piirretty nostejakauman eron prosentuaalinen osuus *NAPA*-ohjelmaan nostejakaumasta. Voimajakaumat laskettuna eri menetelmillä vastaavat toisiaan ja ero on korkeintaan yhden prosentin luokkaa (Kuva 25). Hilat ovat vielä lisäksi melko karkeita 21x27 pistettä tai 20x27 pistettä, joten nostejakauman tulokset näillä hiloilla ovat riittävän tarkat, jotta menetelmää voidaan käyttää myös aaltokuormien laskennassa.



Kuva 25. Loft- ja paneeli-hilalla lasketun nostejakauman prosentuaalinen ero *NAPA*:n nostejakaumaan verrattuna.

5 Analysointimenetelmät

5.1 Muunnos taajuustasoon

Taajuustasossa voidaan erottaa mitatun signaalin muodostaneet komponentit ja niiden voimakkuudet. Muunnos taajuustasoon tehdään suorittamalla signaalille Fourier-muunnos. Aikatasossa jatkuvalla funktiolle Fourier-muunnos ja käänteismuunnos määritellään [17]:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)[\cos(-\omega t) + i \sin(-\omega t)] dt \quad (5-1)$$

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{i\omega t} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)[\cos(\omega t) + i \sin(\omega t)] d\omega, \quad (5-2)$$

jossa i on imaginääriyksikkö ja $x(t)$ funktio, jota muunnetaan. Fourier-muunnos on kompleksinen funktio, jonka reaali-osa kuvaa muunnettavan funktion $x(t)$ kontribuutiota kosinikomponenteille ja imaginääri-osa $x(t)$:n kontribuutiota sinikomponenteille. Taajuuden ω vaihekulma on siten $\arg[X(\omega)]$. Koska käytännössä muunnetaan mittaussignaalia, jonka kesto on äärellinen, tehdään muunnos jakson $t=[t_1, t_2]$ yli. Tällöin määritellään muunnos seuraavasti:

$$X(\omega) = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} x(t)e^{-i\omega t} dt = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} x(t)[\cos(-\omega t) + i \sin(-\omega t)] dt. \quad (5-3)$$

Funktion $x(t)$ taajuudella ω oskilloivan komponentin keskimääräinen amplitudi jaksolla $t=[t_1, t_2]$ on kaksi kertaa muunnoksen itseisarvon $|X(\omega)|$ suuruus. Koska kosinin neliön ja sinin neliön integraalin arvo jakson yli on $\frac{1}{2}$. Integrointijakson $T = t_2 - t_1$ tulisi olla muunnettavan funktion jakson tai sen monikerran pituinen, jotta integrointi antaisi tarkkaan kyseisen taajuuden kontribuution. Fourier-muunnoksen integrointiväli eli näytteen pituus ei kuitenkaan voi vastata kaikkien eri taajuuksien jaksojen monikertaa

5.1.1 Mitatun signaalin muuntaminen taajuustasoon

Mitatun signaali ei muodosta aikatasossa jatkuvaa funktiota vaan se koostuu taajuudella f_N (näytteistystaajuus) mitatuista arvoista. Kun otetaan mitatusta signaalista T_N pituinen näyte, mahtuu tähän väliin N pistettä ($N = T_N \cdot f_N$). Fourier-muunnos tehdään diskreettinä Fourier-muunnoksena (DFT). Matlabissa muunnos tehdään Fast Fourier-muunnoksena (FFT), joka on myös diskreetti Fourier-muunnos [18]:

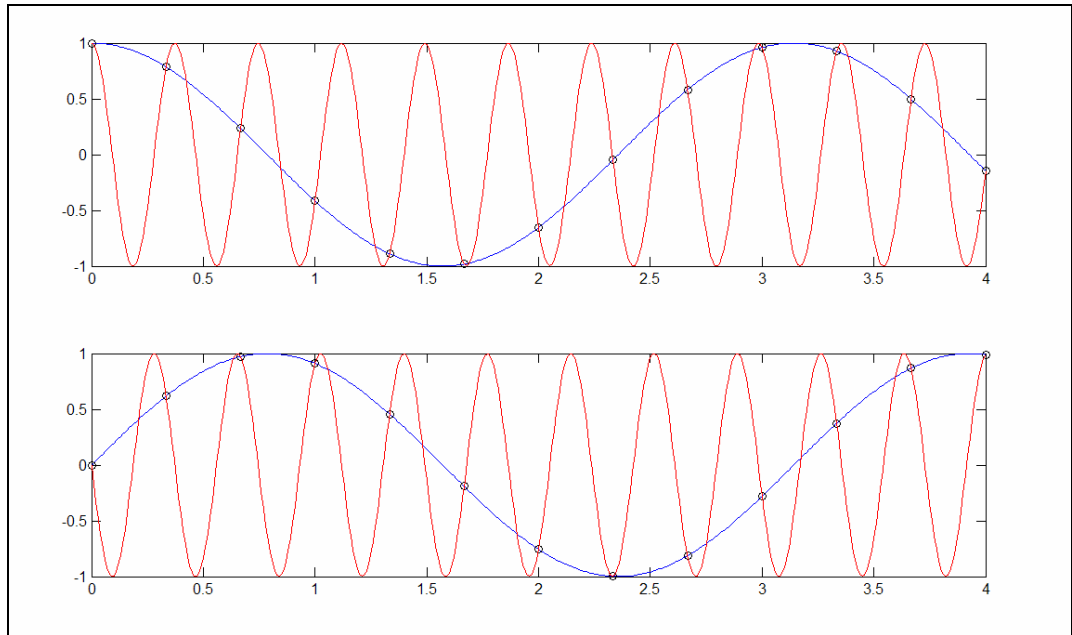
$$\begin{aligned} X(k) &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x(j) e^{(j-1)(k-1) \left(\frac{-2\pi i}{N} \right)} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x(j) \left\{ \cos \left[(j-1)(k-1) \left(\frac{2\pi}{N} \right) \right] + i \sin \left[(j-1)(k-1) \left(\frac{2\pi}{N} \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (5-4)$$

Tämä ei muunna signaalia suoraan taajuuden funktioksi vaan indeksin k funktioksi. Indeksiä k vastaava taajuus ω on:

$$\omega = 2\pi \frac{f_N}{N} (k-1) = \frac{2\pi}{T_N} (k-1) \quad (5-5)$$

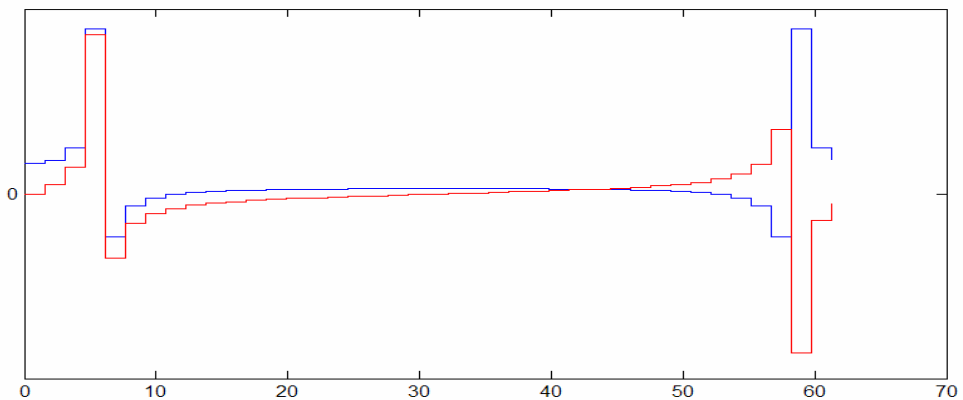
Mitatun signaalin muunnos saadaan siis diskreeteille taajuuksille $\Delta\omega = 2\pi/T_N$ väleihin. Pienin taajuus on 0 ja suurin taajuus $\omega = 2\pi f_N - \Delta\omega$. Suurin taajuus, jota diskreetti signaali voi kuvata on $2\pi f_N/2$ eli puolet näytteistystaajuudesta. Tätä kutsutaan Nyquist taajuudeksi.

Esimerkiksi kosinikäyrän $\cos(\omega_0 t)$, jossa ($0 < \omega_0 < 2\pi f_N/2$), taajuudella f_N näytteistettyjen pisteiden kautta kulkee myös kosinikäyrä $\cos[(2\pi f_N - \omega_0) t]$. Tämän takia muunnos kuvautuu aina kahdelle taajuudelle ω_0 sekä $2\pi f_N - \omega_0$. Samoin taajuudella f_N näytteistetyn funktion $\sin(\omega_0 t)$ pisteet sijoittuvat funktiolle $-\sin[(2\pi f_N - \omega_0) t]$ (Kuva 26).



Kuva 26. Ylemmässä kuvassa kosinikäyrät taajuuksilla $\omega_0=2$ ja $2\pi f_N - \omega_0$. Näytteistystaajuus $f_N=3$. Alemmassa sinikäyrät samoilla taajuuksilla.

Diskreetin Fourier-muunnoksen reaali-osa on symmetrinen taajuuden $\omega=2\pi f_N/2$ suhteen ja imaginääriosa asymmetrinen tämän taajuuden suhteen. (Kuva 27)



Kuva 27. Funktion $x(t)=\cos(5t)$, jota on näytteistetty taajuudella $f=10$ Hz, diskreetti Fourier-muunnos. Reaali-osa on sininen kuvaaja ja imaginääriosa punainen.

Mittasignaali ei pysty kuvaamaan Nyquist taajuutta suurempia taajuuksia. Kuten kuvasta 26 huomataan Nyquist taajuutta suuremmat taajuudet sopivat näytteistyspisteisiin, näiden taajuuksien informaatio on kuitenkin puutteellinen, koska tämän taajuuden jaksonpituudelle osuu vain kaksi mittapistettä. Joten myös suurin taajuus, jota diskreetti muunnos pystyy kuvaamaan, on puolet

näytteistystaajuudesta. Tätä suuremmat taajuudet jätetään muunnoksesta pois. Muunnoksen itseisarvo $|X(\omega)|$ on puolet muunnetun funktion $x(t)$ amplitudista kyseisellä taajuudella ω .

5.1.2 Tehospektri

Signaalin taajuussisällön jakauman tarkasteluun on hyödyllistä käyttää niin sanottua tehospektriä, PSD *power spectral density* [7]. Tehospektristä käytetään myös nimeä energiaspektri. Tämä spektri kertoo funktion taajuussisällön jakautumisesta, mutta hävittää tiedon taajuuskomponenttien vaiheista. Tehospektristä voidaan laskea tietyn taajuuskaistan efektiivinen (tehollinen) amplitudi A_f . Tehospektri lasketaan kertomalla Fourier-muunnos itsensä kompleksikonjugaatilla. Tehospektri diskreetistä signaalista on:

$$S_{xx}(k) = 2\{X(k) \cdot \overline{X(k)}\} \frac{1}{\Delta\omega}, \quad (5-6)$$

jossa kulmataajuus on k :n funktio $\omega = 2\pi f_N / N * (k - 1)$ yhtälö (5-5).

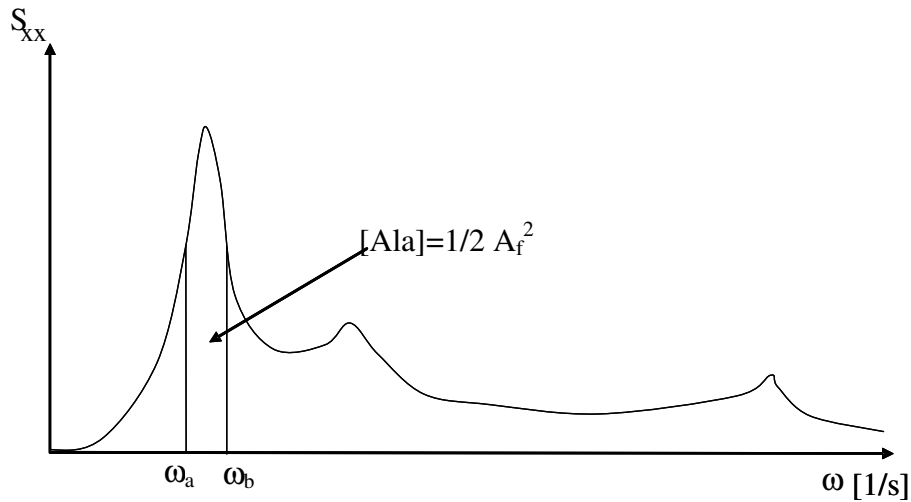
Tehospektrin alle jäävä pinta-ala taajuuskaistan $[\omega_a, \omega_b]$ välillä vastaa tämän taajuuskaistan sisältämää energiaa (Kuva 28). Esimerkiksi aallokossa energia neliömetrin kokoista pinta-alaa kohti on riippuvainen veden tiheydestä ρ ja maan putoamiskiihtyvyydestä g , jolloin $E = \rho g [A \Delta\omega]$.

Taajuuskaistan sisältämästä energiasta voidaan myös laskea kyseisen taajuuskaistan tehollinen eli efektiivinen amplitudi, sillä taajuuskaistan sisältämä energia on myös riippuvainen amplitudin neliöstä. Vertaa säännöllisen aallokon energian yhtälö (2-21), jonka mukaan $E = 1/2 \rho g A_w^2$. Tällöin tehollisen amplitudin ja tehospektrin alle jäävän alan välillä on seuraava yhteys:

$$\frac{1}{2} [A_f(\omega_a, \omega_b)]^2 = \int_{\omega_a}^{\omega_b} S_{xx}(\omega) d\omega \quad (5-7)$$

$$A_f(\omega_a, \omega_b) = \sqrt{2 \int_{\omega_a}^{\omega_b} S_{xx}(\omega) d\omega} \quad (5-8)$$

Esimerkiksi epäsäännöllisen aallokon sisältämä energia jollakin taajuuskaistalla $[\omega_a, \omega_b]$ on sama kuin jos aallokko korvattaisiin säännöllisellä aallokolla, jonka aallonkorkeus on $H_w = 2A_f$. Värähtelyjen tapauksessa efektiivinen amplitudi tarkoittaa, että yhden taajuuden värähtelyllä tehollisella amplitudilla on sama energia kuin kyseisen taajuuskaistan värähtelyillä yhteensä.



Kuva 28. Tehospektri. Jos funktion $x(t)$ yksikkö on Pascalia, tehospektrin yksikkönä on tällöin Pa^2s . Taajuusvälin $[\omega_a, \omega_b]$ efektiivisen amplitudin A_f neliö vastaa saman taajuusvälin kuvaajan alle jäävää alaa.

5.1.3 Ikkunointi

Muunnettaessa T_N pituinen näyte taajuustasoon, aiheutuu tästä ns. katkaisuefekti taajuusmuunnokseen niille taajuuskomponenteille, joiden jakson pituus tai sen monikerta ei ole T_N pituinen. Tätä efektiä kutsutaan vuotamiseksi (leakage). Vuodon määrä on verrannollinen taajuuteen ja jaksonpituuteen käänteisesti. Vuotamista voidaan estää kertomalla aikakehyksen signaali ikkunafunktiolla. Kertominen ikkunafunktiolla tekee aikakehyksen T_N signaalista jaksollisen funktion. Käytettyjä ikkunafunktioita on useita, värähtelyanalyysissä hyväksi todettu ja useimmin käytetty on Hanning ikkunafunktio $w(j)$.

$$w(j) = \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi(j-1)}{N-1}\right) \right] \quad , \quad \text{jossa } 1 \leq j \leq N \quad . \quad (5-9)$$

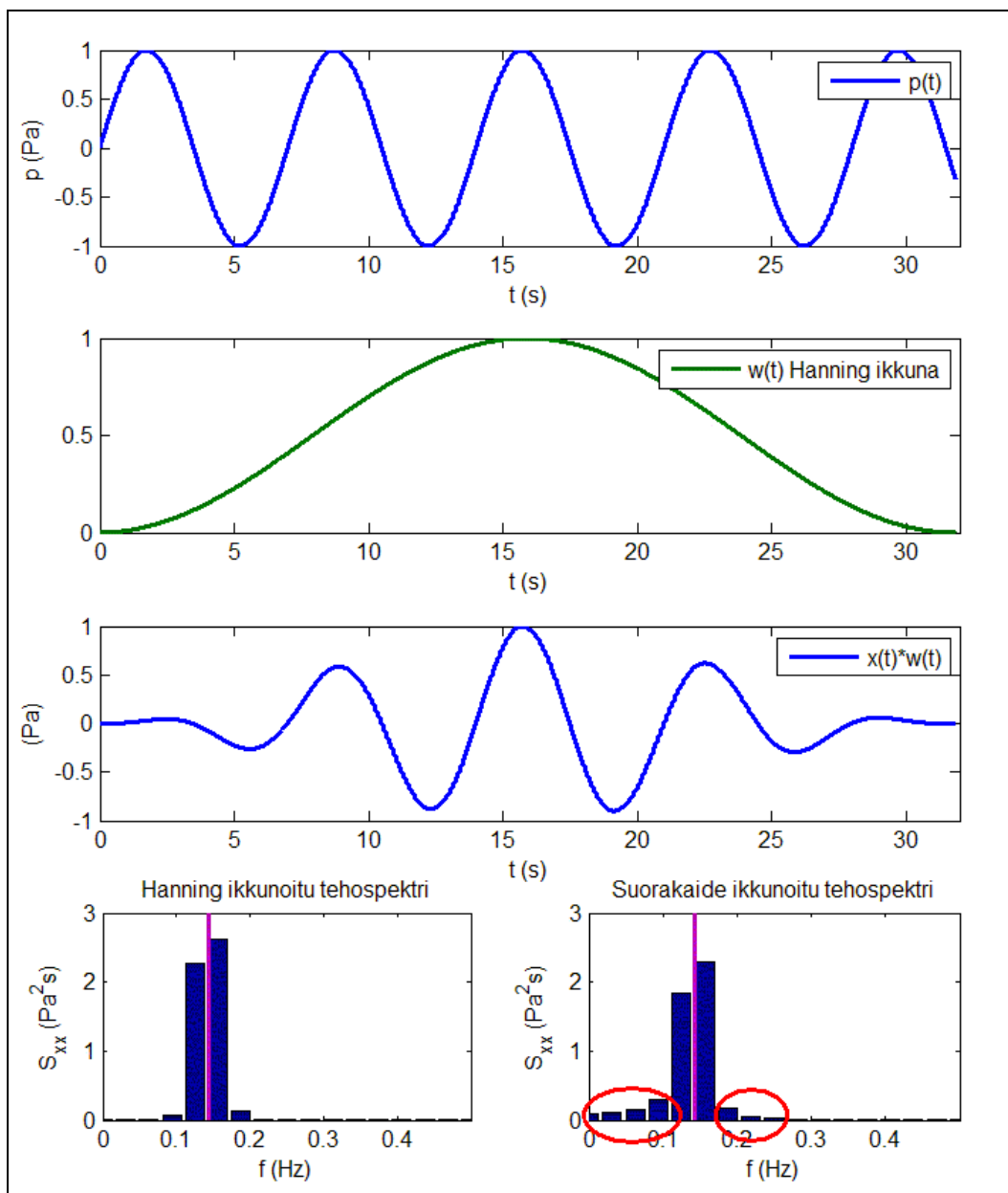
Jos ei käytetä mitään ikkunafunktiota, on kyse suorakaiteen muotoisesta ikkunasta, jonka ikkunafunktion arvo on yksi. Ikkunointi voidaan myös toteuttaa kertomalla ainoastaan aikakehyksen päädyt esim. Hanning ikkunan puolikkailla. [19]

Ikkunoinnissa signaalin amplitudi pienenee, koska se kerrotaan funktiolla, jonka arvot ovat väliltä $[0,1]$. Amplitudin tasojen heikkeneminen riippuu käytettävästä ikkunafunktiosta. Tasojen heikkeneminen tulee ottaa huomioon laskettaessa tehospektriä ikkunoidusta signaalista.

Seuraava esimerkki esittää käytännössä ikkunoinnin toteuttamisen (Kuva 29). Taajuusvuotoa aiheutuu enemmän ikkunoinnille funktiolla. Tässä esimerkissä signaalin jakson pituus on tarkoituksella eri kuin ikkunan pituus, jolloin taajuusvuotamista esiintyy. Kuvan 29 ylimmässä kuvassa on piirretty muunnettava signaali, joka on sinifunktio. Ikkunan pituus ei ole funktion jakson tai sen monikerran pituinen. Signaali kerrotaan Hanning ikkunalla, jolloin saadaan aikakehyksessä jatkuva funktio. Tämän jälkeen tämä funktio Fourier-muunnetaan taajuustasoon ja lasketaan sen tehospektri edellä esitellyn yhtälön (5-6) mukaan.

Tehospektrin alle jäävän alan tulisi vastata funktion tehollisen amplitudin neliötä. Hanning ikkunalla kerrottuna funktion arvot ovat kuitenkin pienemmät kuin alkuperäisellä funktiolla, joten tehospektri on kerrottava kertoimella $8/3$, jotta tehospektrin alle jäävä ala vastaisi alkuperäisen signaalin tehollista amplitudin neliötä.

Kerrottaessa signaali ikkunafunktiolla sen alku ja loppupään arvot pienenevät. Samalla alku ja loppupään painoarvo pienenee. Pidempi signaali jaetaan useisiin ikkunoihin siten, että ikkunat limittyvät puoliksi toistensa päälle. Jokaiselle ikkunalle tehdään erikseen muunnos taajuustasoon ja tämän jälkeen kaikki muunnokset summataan yhteen ja jaetaan ikkunoiden määrällä. Toisin sanoen lasketaan kaikkien muunnosten keskiarvo. Ikkunoiden limittäminen takaa sen, että koko signaalin painoarvo säilyy samana. Ainoastaan signaalin alusta ja lopusta jää molemmista puolen ikkunan pituinen jakso vähemmälle painotukselle.

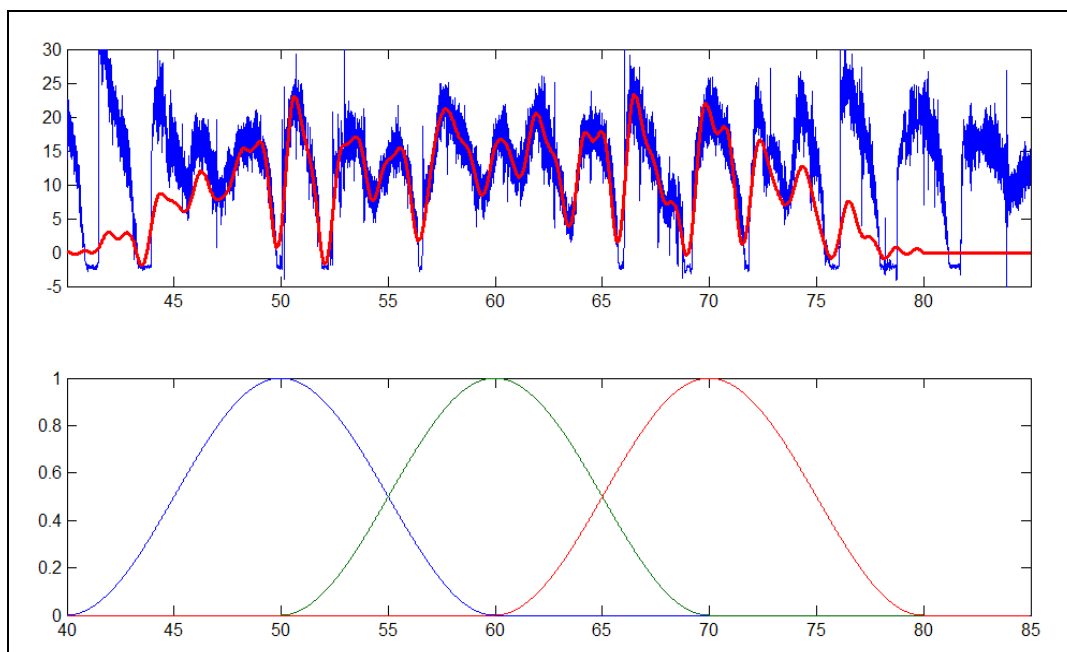


Kuva 29. Ikkunointi 32 s pituisella ikkunalla. Ylin kuvaaja esittää varsinaista signaalia, tässä signaali on sini funktio, jonka jaksonpituus $T=7$ s, funktion amplitudi on yksi. Toisessa kuvassa on Hanning ikkuna. Kolmannessa kuvassa on signaali kerrottuna Hanning ikkunalla. Alimpana oikealla on tehospektri Hanning ikkunoidusta signaalista tehtynä ja vasemmalla tehospektri suorakaide ikkunoidusta signaalista. Tehospektrin kuvaajiin on merkitty ohuella pystyviivalla signaalin taajuus $f=1/T \approx 0,14$ Hz.

5.2 Signaalin suodattaminen

Signaalista voidaan suodattaa haluttuja taajuuksia pois tai ottaa esiin vain tietyn taajuusvälin komponentit käyttämällä Fourier-muunnosta. Fourier-muunnosta signaalista voidaan asettaa nolaksi taajuuskomponentit, jotka halutaan suodattaa pois. Tämän jälkeen muunnetaan käsitelty signaalin Fourier-muunnos takaisin aikatasoon, jolloin signaalista on suodatunut taajuustasossa nolaksi asetetut komponentit pois. Fourier-muunnoksessa ja käänteismuunnoksessa ei hävitetä mitään informaatiota signaalista. Signaalin vaihe säilyy, koska käytetään kompleksista Fourier-muunnosta.

Signaalia suodatettaessa on myös otettava mahdollinen taajuusvuoto huomioon. Tämän takia suodatettava signaali on syytä ikkunoida. Suodatus käyttäen ikkunointia tehdään kertomalla jokaisen aikakehyksen signaali ikkunafunktiolla. Ikkunoidaan siis jokainen aikakehys ja suodatetaan niiden signaali samoin kuin aiemmin kuvattu eli eliminoimalla taajuusmuunnoksesta suodatettavat taajuudet ja käänteismuuntamalla käsitelty taajuusmuunnos takaisin aikatasoon. Suodatus tehdään jokaiselle ikkunalle erikseen (Kuva 30).



Kuva 30. Ylempässä kuvassa alkuperäinen signaali (sinisellä) ja se suodatettuna (punaisella) käyttäen 20s pituista Hanning ikkunointia. Alemmassa kuvassa kolmen limittäisen aikakehyksen Hanning ikkunafunktiot.

Tämän jälkeen ikkunoitu, suodatettu signaali yhdistetään ja ikkunat limitetään puolittain, jotta signaalilla olisi sama painoarvo. Alkupäästä signaalia puolikkaan ikkunan pituinen osuus supistuu, koska sen edessä ei ole limittäistä ikkunaa, joka palauttaisi sen painotusarvon ykkösen tasolle, loppupäässä signaalia käy samoin.

6 Mittaustulosten esittäminen

Mitattuja kanavia on paljon, sillä pelkästään paineantureita oli 75 kpl. Kaikkien kanavien signaalin esittäminen aikatasossa on erittäin hankalaa. Kanavien paljouden takia oli kehitettävä keino esittää oleellinen informaatio mittauksista. Laivan liikkeistä valittiin vain jyskintä ja kohoilu tarkasteluun, sillä näillä oletetaan olevan eniten mahdollista vaikutusta aaltokuormiin. Slamming kuormissa jyskinnällä on suuri merkitys. Slamming tapauksissa kuormitukset ovat kuitenkin enemmän yksittäisiä iskuja ja aiheuttavat transientti tyyppisen vasteen. Tässä pyritään tutkimaan jatkuvaa resonanssityyppistä kuormitusta. Laivan liikkeiden taajuudet ovat todennäköisesti huomattavasti pienempiä kuin resonanssitaajuuDET.

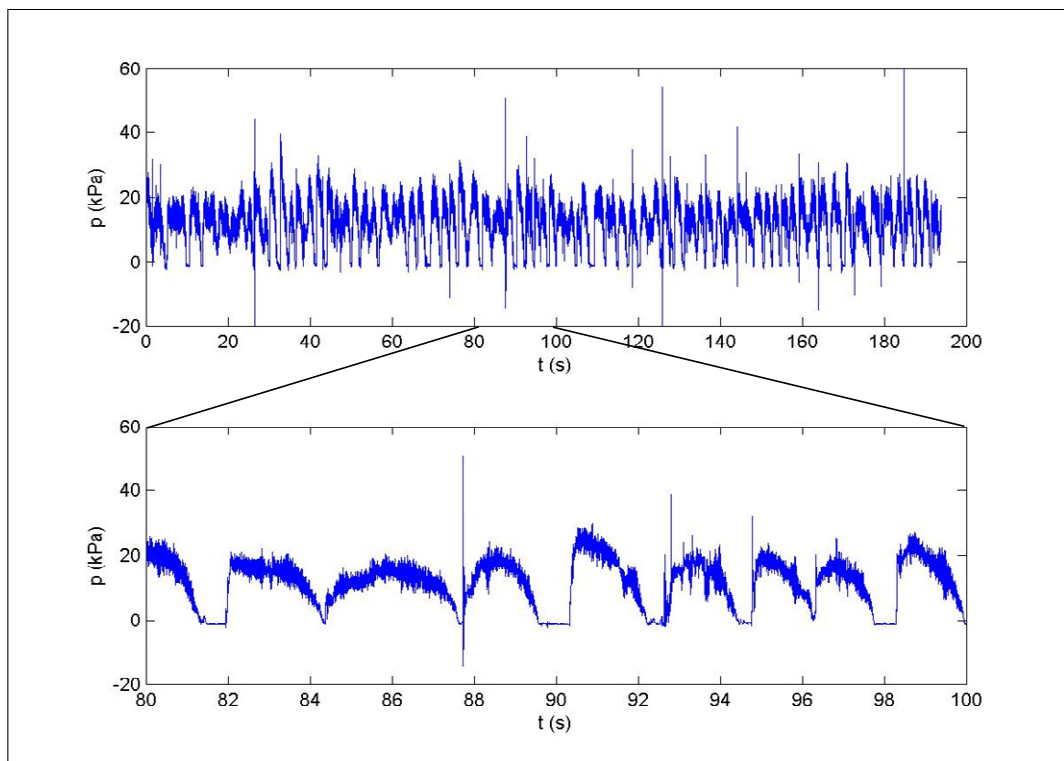
Suhteellisen liikkeen anturit antavat tärkeän tiedon aallokosta eli varsinaisesta kuormituksen aiheuttajasta. Kokeita oli ajettu epäsäännöllisessä aallokossa, josta ilmoitettiin merkitsevä aallonkorkeus H_S ja aallokon modaaliperiodi T_P eli peak periodi. Jokaista ajoa varten on pyritty aaltokoneella muodostamaan samanmuotoinen aaltospektri. Aaltokoneella tehdyn epäsäännöllisen aallokon spektri ei aina välttämättä ole täysin halutun muotoinen. Herätevoimaa on verrattava aallokon spektriin, siksi tieto todellisesta mallin kohtaamasta aaltospektristä on tärkeä.

Aivan keulassa sijainneen suhteellisen liikkeen anturin signaalista laskettiin kohdatun aallokon spektri. Keulassa sijainneen suhteellisen liikkeen anturin mittaama aalto on vähiten häiriintynyt mallista heijastuneista aalloista. Jos laivan liikkeet ovat pieniä aallon korkeuteen verrattuna, on keulan suhteellisen liikkeen anturin signaali sama kuin todellinen kohdattu aallokko. Jos mallin kohoilu ja jyskinnän aiheuttama pystysuuntainen liike keulassa eivät ole pieniä, voidaan nämä vähentää suhteellisesta liikkeestä, jolloin saadaan todellinen kohdattu spektri. Liikkeiden vähentäminen ei toisaalta ole välttämätöntä, sillä ongelmaa voidaan ajatella siten, että malli kohtaa tietynlaisen aaltospektrin, jonka aiheuttamaa herätevoimaa tutkitaan, vaikka tässä spektrissä olisi liikkeiden aiheuttama lisä.

Tässä kappaleessa 6 esitellään mittaustulosten esittämistapa käyttäen mittaustuloksia ajosta, jossa merkitsevä aallonkorkeus on 2,0 metriä ja kohtaamiskulma 160 astetta.

6.1 Mitattu signaali aikatasossa

Kuvassa 31 on esitetty anturin nro 49 signaali suodattamattomana koko mittausajon ajalta. Anturi 49 sijaitsee konstruktiovesiviivalla kaarella 18. Alemmassa kuvassa on otettu samasta signaalista lyhyemmän ajanjakson pätkä. Alemmasta kuvasta näkyy jo paineherätteen muoto kyseisellä ajolla anturin 49 kohdalla. Jos halutaan tarkastella paineherätteen muotoa aikatasossa eri kohdilla laivan runkoa, olisi jokaisen anturin aikahistoriasta piirrettävä kuva ja jokaista kuvaa tutkittava erikseen. Tämä olisi erittäin työlästä ja antaisi subjektiivisen kuvan herätteestä. Jokaisen anturin signaalista voitaisiin esimerkiksi ottaa maksimi-arvo ja verrata näitä toisiinsa. Satunnaiset piikit kuormitushistoriassa, jotka todennäköisesti johtuvat anturin ominaisvärähtelytaajuudesta, antaisivat liian suuren arvon kuormituksen maksimeihin. Esimerkiksi piikki alemmassa kuvassa 31 noin 87,5 sekunnin kohdalla. Vaikka tällainen piikki olisikin todellinen herätevoima eikä häiriö, sen aiheuttama impulssi eli kyky herättää värähtelyä olisi häviävän pieni piikin kapeuden takia, kuten todettu kohdassa 2.1.4.



Kuva 31. Anturin nro 49, joka sijaitsee konstruktiovesiviivalla kaarella 18, signaali aikatasossa. Ylemmässä kuvassa signaali koko mittausajon aikajaksolta, alemmassa sama signaali 20s pituisella aikajaksolla. $H_S=2,0$ m ja $\beta=160$ deg.

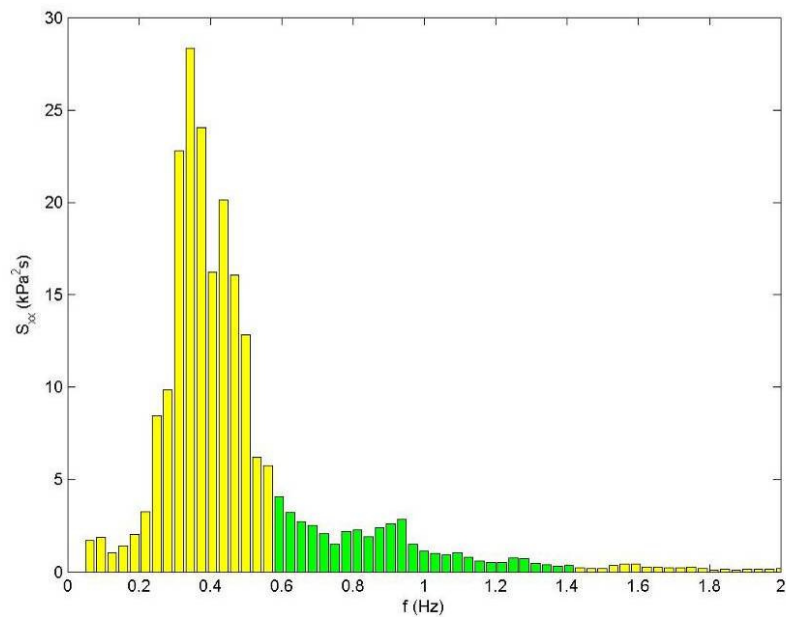
6.2 Mitatun signaalin esittäminen taajuustasossa

Värähtelyjä herättävän kuormituksen sijainnin ja voiman arvioinnin kannalta on oleellista tietää millä taajuudella kuorma vaikuttaa. Pelkät signaalin maksimi- tai teholliset arvot eivät kerro kuormituksen kyvystä herättää värähtelyä. Iskumaiset kuormat herättävät kaikkien taajuuksien värähtelyitä, kun taas jaksollinen kuorma pienelläkin amplitudilla herättää värähtelyä, jos laivan ominaistaajuus osuu samalle taajuudelle tai sen monikerroille. Taajuustasossa signaalista nähdään eri taajuuksien kontribuutio kuormitukseen. Iskumaiset kuormat näkyvät taajuustasossa jakautuneena kaikille taajuuksille, kun taas harmoniset kuormat näkyvät piikkinä vain niiden taajuudella. Jos iskumainen kuorma toistuu jollakin taajuudella, näkyy tämä piikkinä kyseisellä taajuudella ja sen monikerroilla. Kun tehdään signaalille taajuusmuunnos ja muodostetaan siitä tehospektri, voidaan tällöin tehospektristä laskea tietyn taajuusvälin tehollinen amplitudi.

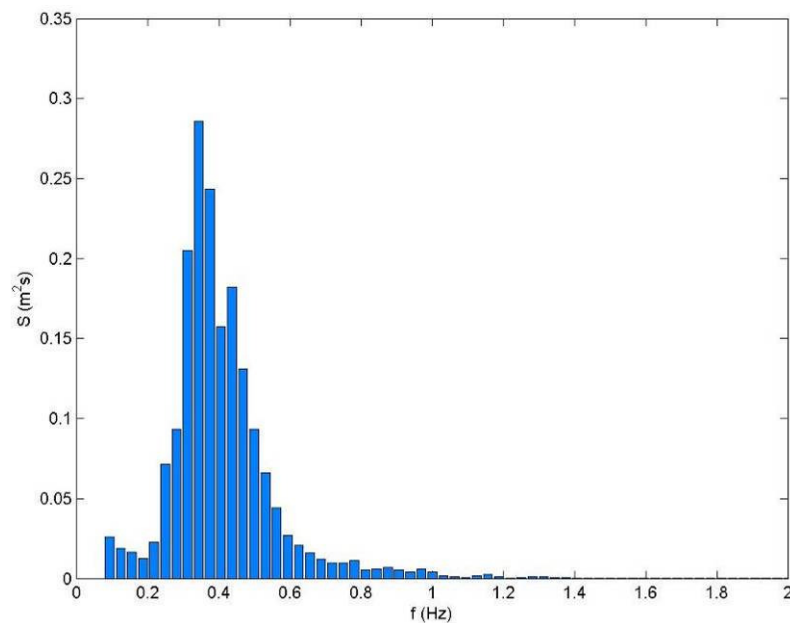
6.2.1 Kaikkien paineantureiden signaalit taajuustasossa

Kuvassa 32 on esitetty anturin 49 signaali muunnettuna taajuustasoon. Kuvassa 33 taas on kohdattu aaltospektri samasta ajosta. Anturin signaali ja kohdatun aaltospektrin signaali ovat hyvin samanmuotoisia. Anturin signaalissa on huomattavissa taajuusvälillä $0,6 - 1,4$ Hz suhteessa korkeampia arvoja kuin aaltospektrissä. Juuri näistä mahdollisesti toisen tai korkeamman kertaluokan kuormituksista ollaan kiinnostuneita. Kaikissa mittausajoissa kohtaamistaajuus on alle $0,6$ hertsiä. Ensimmäisen kertaluokan kuormitus on haluttu jättää pois tarkasteluvälistä. Tarkasteluväliksi taajuustasossa valitaan $0,6 - 1,4$ Hz. Laivan ensimmäisen poikittaisen ja pystysuuntaisen värähtelymuodon taajuus osuu tälle välille, mahdollisesti myös vääntövärähtelyn ensimmäinen taajuus, riippuen laivan rakenteista ja massajakaumasta. Signaalin korkeammat taajuudet ovat myös kiinnostavia, mutta niiden esittäminen samassa kuvassa ei ole järkevää, sillä suuruusluokka korkeammilla taajuuksilla on huomattavasti pienempi. Ensimmäisen kertaluokan kuormituksen eliminoiminen ei kuitenkaan onnistu, vaikka jätettäisiin kohtaamistaajuuden piikkitaajuus tarkasteltavan taajuusvälin ulkopuolelle. Aaltospektri sisältää myös korkeampien taajuuksien aaltoja, jotka osuvat tarkasteltavalle taajuusvälille. Tällöin on mahdotonta sanoa aiheutuuko kuormitus

suurimpien aaltojen toisesta tai, jostain korkeammasta kertaluvusta, vai pienempien aaltojen ensimmäisestä kertaluvusta.



Kuva 32. Anturin nro 49, signaali taajuustasossa. Signaalin tehospektri. $H_s=2,0$ m ja $\beta=160$ deg.



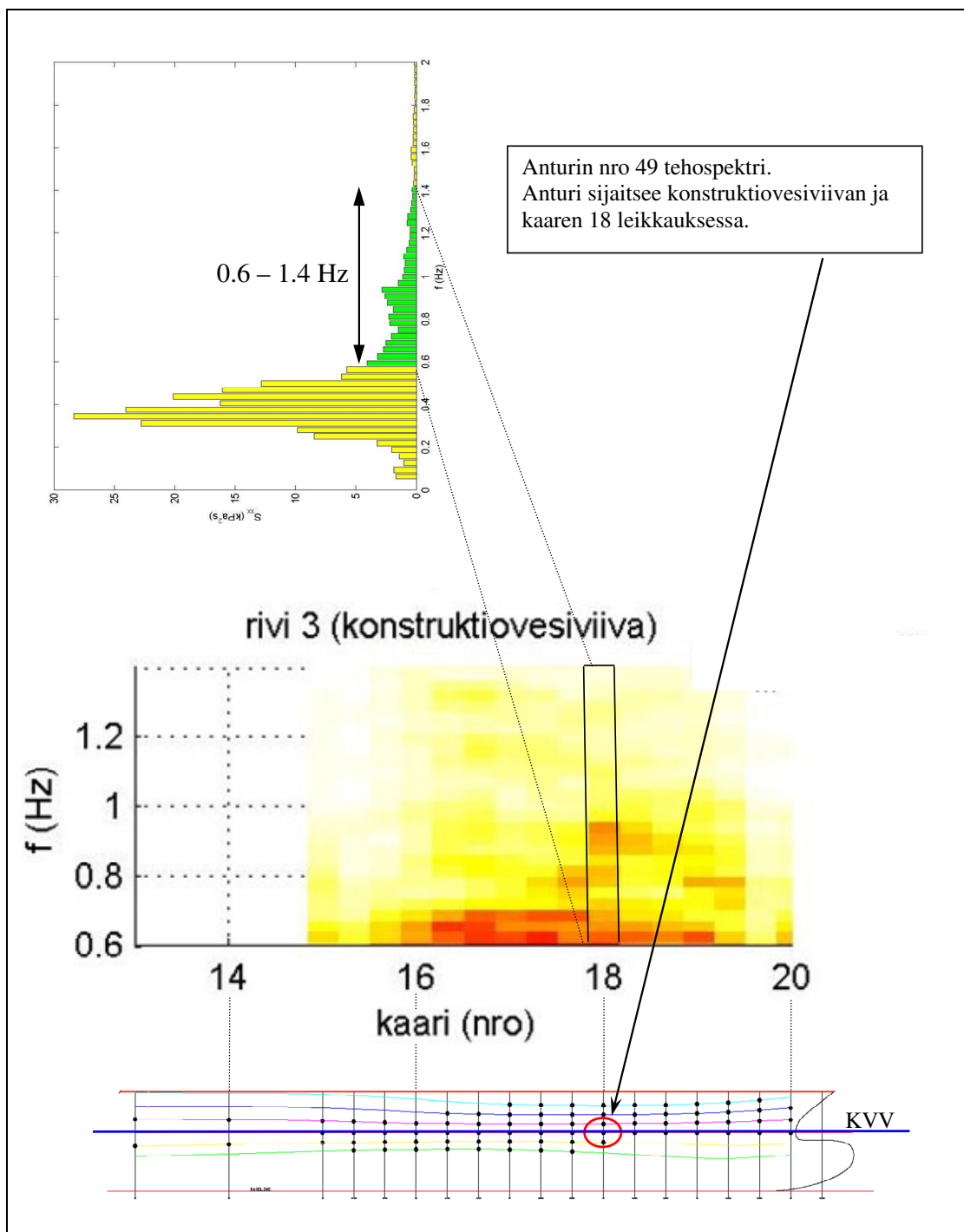
Kuva 33. Kohdattu aaltospektri. Laskettu keulan suhteellisen liikkeen anturin signaalista. $H_s=2,0$ m ja $\beta=160$ deg.

Kuvia 32 ja 33 tarkasteltaessa vaikuttaa, että tarkasteltavan taajuusvälin kuormitus taajuusvälin pienimmillä taajuuksilla, välillä $0,6 - 0,8$ Hz, aiheutuu aaltospektrin

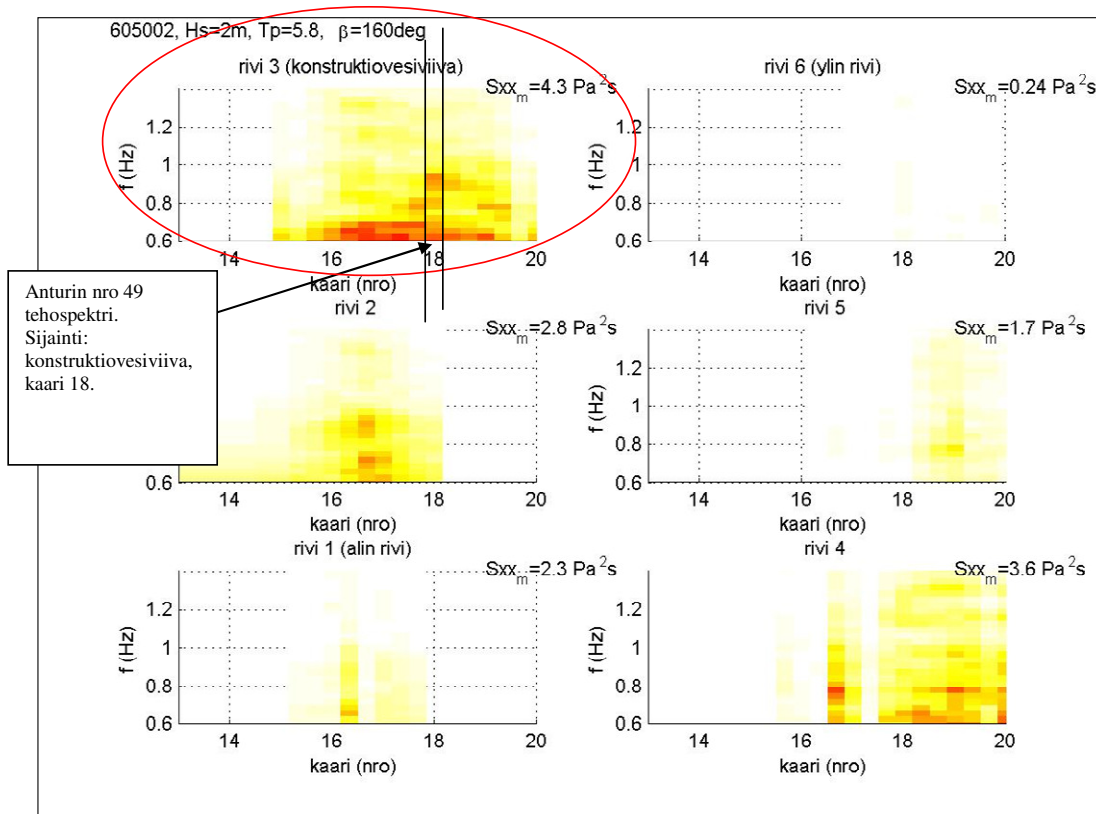
korkeampien taajuuksien ensimmäisestä kertaluokasta, toisin sanoen aaltospektrin häntä osuu tarkasteltavalle taajuusvälille. Lisäksi kuvista huomataan, että kuormituksen arvot taajuusvälillä $0,8-1,0$ Hz ovat huomattavasti suuremmat kuin aaltospektrin arvot tällä välillä. Nämä ovat selvästi korkeamman kertaluvun kuormituksia.

Yhdistetään kaikkien konstruktiovesiviivalla sijaitsevien antureiden tehospektrit samaan kuvaan. Kuva 34 esittää anturin nro 49 tehospektrin yhdistämistä samaan kuvaan muiden konstruktiovesiviivan antureiden spektrien kanssa. Ylimmässä kuvassa on anturin 49 tehospektri (kuva 32) käännettynä 90 astetta, jolloin pystyakselilla on taajuus ja vaaka-akselilla spektrin voimakkuus. Keskimmaisessä kuvassa on kaikkien konstruktiovesiviivan antureiden tehospektrit. Anturin nro 49 spektri on keskimmaisessä kuvassa ympyröity laatikolla, kuvan vaaka-akselilla on konstruktiokaarisijainti ja pystyakselilla taajuus, kuvan z -akselilla on tehospektrin arvo. Tehospektrin arvo on keskimmaisessä kuvassa esitetty väreillä, vaalea keltainen väri tarkoittaa pientä arvoa ja tummempi punainen suurempaa arvoa. Konstruktiovesiviivalla on antureita kaarelta 15 kaarelle 20 asti. Alimmassa kuvassa on laivan kylki konstruktiokaaresta nro 13, kaarelle 20 (keula) asti. Kylkeen on merkitty antureiden sijainnit. Anturin nro 49 sijainti on merkitty punaisella ympyrällä.

Kuvassa 34 on esitetty konstruktiovesiviivalla sijaitsevien antureiden signaali taajuustasossa samassa kuvassa. Laivan kyljelle oli asennettu antureita kaksi riviä konstruktiovesiviivan alapuolelle ja kolme riviä konstruktiovesiviivan yläpuolelle. Jotta voitaisiin nähdä kerralla kaikkien antureiden signaalien taajuussisältö, esitetään kuvassa 35 jokaisen anturirivin tehospektrit. Kaikki kuvat ovat samassa skaalassa, tummempi väri (punainen) tarkoittaa suurempaa arvoa. Jokaisen rivin maksimi-arvo on ilmoitettu kuvan oikeassa yläreunassa. Vasemmassa alareunassa on alimman rivin kuva, tämän yläpuolella on toiseksi alimman rivin kuva. Vasemmassa yläreunassa ympyröitynä on konstruktiovesiviivan antureiden kuva, vertaa kuva 34. Oikeassa alareunassa on konstruktiovesiviivan yläpuolisen (neljännen) rivin antureiden kuva. Ylimpänä oikeassa kulmassa on ylimmän rivin antureiden kuva. Tässä tapauksessa ylimmän anturirivin kuvassa ei voi erottaa muuta kuin valkoista, koska aallokko ei ole tässä ajossa juurikaan noussut ylimmälle riville asti.



Kuva 34. Anturin nro 49 tehospektri yhdistettynä samaan kuvaan kaikkien konstruktiovesiviivan antureiden spektrien kanssa. Kuvan alareunassa on esitetty kaikkien antureiden sijainnit. Anturin nro 49 sijainti ympyröitynä. $H_S=2,0$ m ja $\beta=160$ deg.



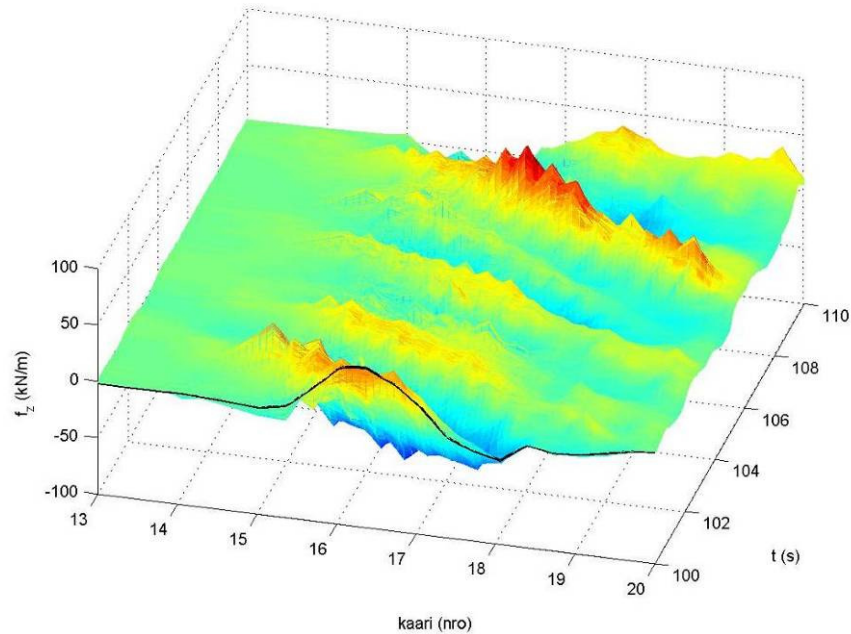
Kuva 35. Kaikkien antureiden signaali muunnettuna taajuustasoon tehospetriksi. Jokaisessa kuvassa on esitettyä yhden rivin anturit. Kaikki kuvat ovat samassa skaalassa, tummempi väri(punainen) tarkoittaa suurempaa arvoa. Jokaisen rivin maksimiarvo on ilmoitettu kuvan oikeassa yläreunassa. $H_S=2,0$ m ja $\beta=160$ deg.

Jokaisesta analysoidusta ajosta on muodostettu tällainen kuva, jossa on kaikkien kuuden anturirivin signaalit taajuustasossa (Liite A). Kuvista voidaan löytää rungon kohta tai kohdat, joissa kuormituksella on osuutta suuremmilla taajuuksilla.

6.3 Viivakuorma

Painemittausten perusteella on laskettu jokaisella laivan poikittaisleikkauksella runkoon kohdistuva pystysuuntainen ja poikittaissuuntainen kuormitus eli viivakuorma käyttäen kohdassa 4.2 esitettyä laskentamenetelmää. Aikatasossa pystysuuntainen viivakuorma on esitettävä kolmiulotteisena kuvaajana (Kuva 36), koska muuttujina on ajan ja voiman lisäksi sijainti laivan pituusakselilla, joka on tässä ilmoitettuna kaarisijaintina. Kuvassa viivakuorma on keskiarvoistettu mutta ei suodatettu. Mallin keulan runkomuoto ja kaarisijainnit ovat merkitty kuvassa 11.

Kuvassa 36 näkyy aallon kulkeminen laivan kyljen ohi kuormituksen f_z harjana. Kuormituksen arvot ovat hyvin pieniä 13. kaarella sillä rungon laita on jo melko pystysuora tällä kohdalla, eikä siten pystysuuntaista voimaa tällä kohdalla aiheudu.

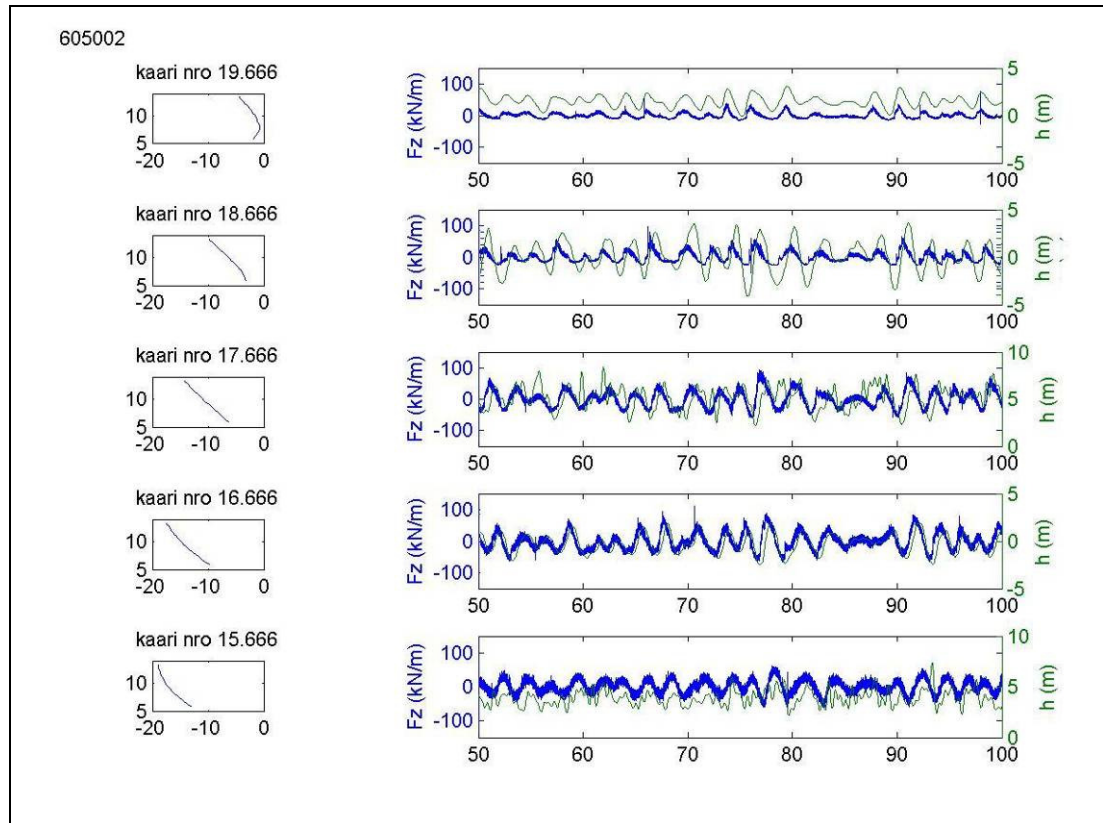


Kuva 36. Kuormituksen z -suuntainen viivakuorma $f_z(x,t)$ ajan funktiona. Kuvassa vaaka-akselilla on kaarisijainti 13. kaaresta 20. kaareen asti. Oikeassa laidassa olevalla akselilla on aika, tässä on esitetty 10 s pituinen aikajakso, aikaväliltä 100 - 110 s. Pystyakselilla on kuormituksen suuruus. $H_S=2,0$ m ja $\beta=160$ deg.

Kuvasta 36 on vaikea hahmottaa kuormitusta eri kaarisijainneilla, joten viideltä eri kaarisijainnilta (poikkileikkaukselta) on piirretty kuormituksen kuvaajat ajan funktiona aikaväliltä 50–100 s (Kuva 37). Kuvan vasemmassa laidassa on kaaren muoto kohdassa, jossa kuormitus on laskettu. Kaikkien tapausten kuvat ovat liitteessä A.

Viivakuorman verhokäyrät kertovat viivakuorman maksimit ja minimi (Kuva 38). Maksimi- ja minimiarvoista ei voi päätellä hetkittäisen kuormituksen tasoa sillä hetkittäinen kuorma kulkee näiden verhokäyrien välissä. Pystysuuntaisesta viivakuormasta hetkellä $t=100$ s näkyy, että aallon pituus tässä tapauksessa laivan kyljellä on noin kaksi kaariväliä, joten maksimikuormitus osuu noin yhden konstruktiokaarivälin pituiselle alueelle tietyllä ajan hetkellä. Verhokäyristä ei myöskään voi päätellä minkälainen kuormituksen luonne on ollut, onko ollut

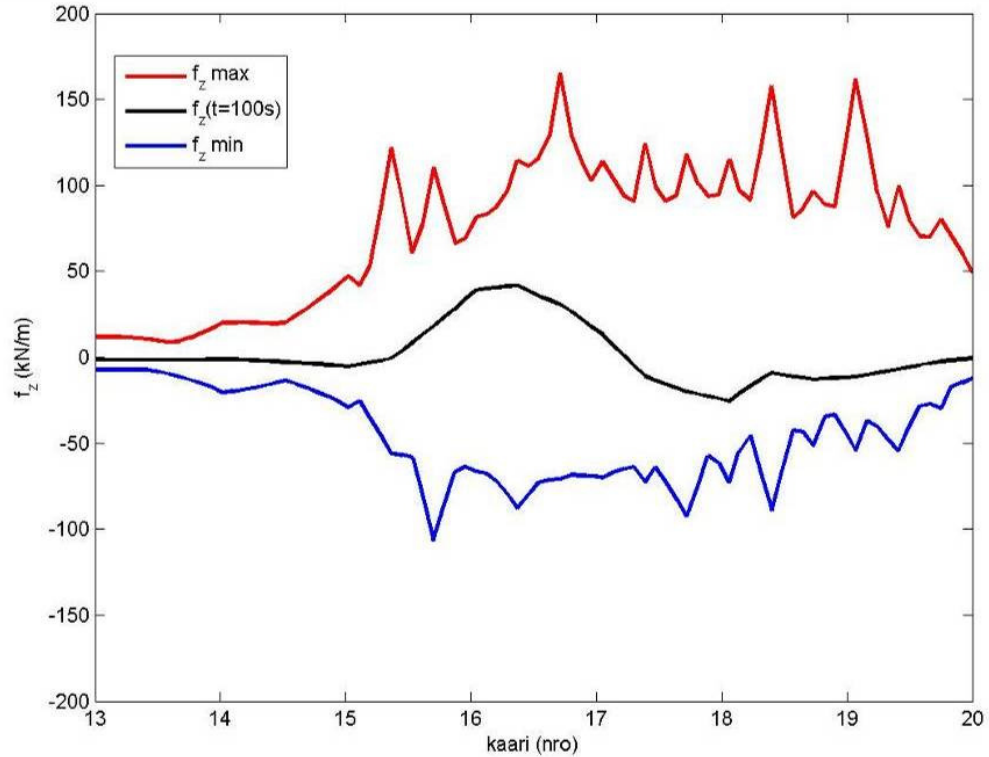
iskumaisia voimia vai hitaasti nousevia voimia. Lisäksi verhoikäyrät pitävät sisällään yksittäisiä kuormituspiikkejä, joten ne antavat kuormituksesta hyvin suuren kuvan. Tärkeämpää on saada tietoa kuormituksen taajuussisällöstä. Paremmin kuormituksen suuruusluokkaa kuvaavat teholliset amplitudit.



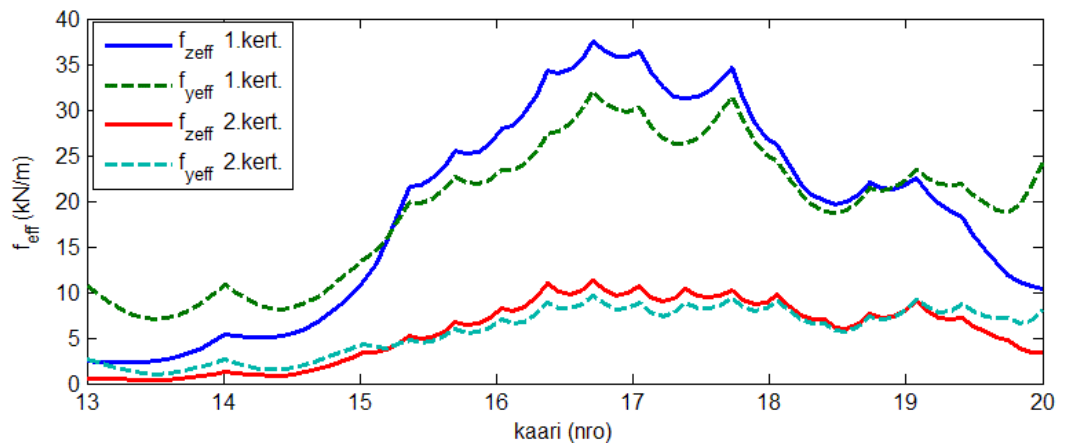
Kuva 37. Pystysuuntainen kuormitus viidellä eri kaarisijainnilla (sininen käyrä). Suhteellinen liike samoilla kaarisijainneilla kuin kuormitus (vihreä käyrä). Kuormituksen skaala on kaikissa kuvissa sama ± 120 kN/m. Suhteellisen liikkeen skaala on myös kaikissa kuvissa sama ± 5 m. $H_S=2,0$ m ja $\beta=160$ deg.

Viivakuorman kuormituksesta on laskettu teholliset amplitudit eri taajuusväleille (Kuva 39). Taajuusvälille, jolle osuu ensimmäisen kertaluokan kuormitus, tehollinen spektri on huomattavasti suurempi kuin kapeammalle taajuusvälille jolle ensimmäisen kertaluokan kuormitus ei enää osu. Kuvassa tehollisen spektrin poikittais- ja pystysuuntaa verrattaessa huomataan, että taaempana 13 kaaren kohdalla, jossa laita on hyvin pystysuora, poikittaissuuntainen voima on suurempi. Samoin keulassa 20 kaaren kohdalla poikittaissuuntainen voima on suurempi. Keulassa laita on myös jyrkempi. Kuvassa 39 huomataan useita lokaaleja piikkejä. Yhdelle kaarivälille mahtuu neljä lokaalia piikkiä, jotka sijaitsevat samoilla kohdilla

kuin anturisarakkeet. Nämä piikit johtuvat paineen interpoloinnista antureiden välillä. Paineen huippuarvo antureiden välillä pienenee interpoloitaessa painetta lineaarisesti.



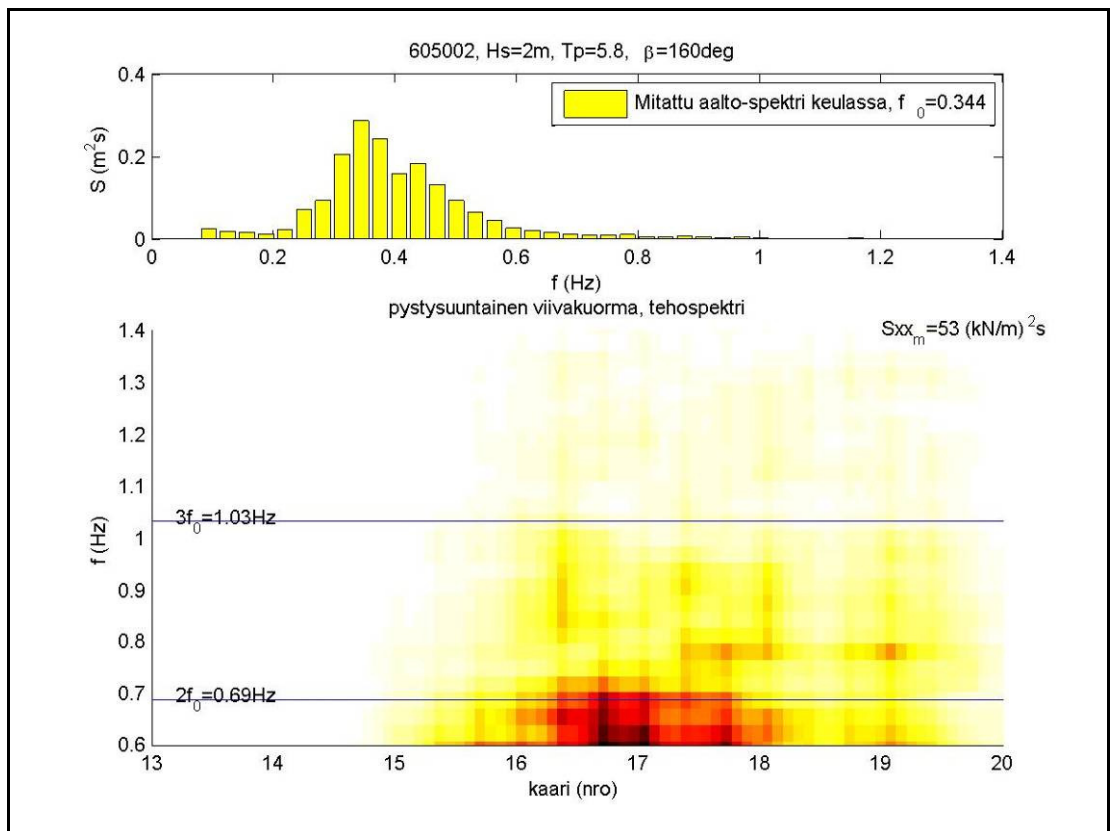
Kuva 38. Pystysuuntaisen viivakuorman verhoikäyrät sekä viivakuorma ajan hetkellä $t=100$ s. $H_S=2,0$ m ja $\beta=160$ deg.



Kuva 39. Viivakuorman teholliset amplitudit. Ensimmäisen kertaluokan tehollinen amplitudi on laskettu taajuusväliltä 0-1,4 Hz ja toisen kertaluokan tehollinen amplitudi taajuusväliltä 0,6-1,4 Hz. Kuvassa on teholliset amplitudit sekä pysty- että poikittaissuunnan viivakuormille. Pystysuunnan tehospektrit ovat piirretty yhtenäisellä viivalla ja poikittaissuunnan katkoviivalla. $H_S=2,0$ m ja $\beta=160$ deg.

Viivakuorman taajuussisällöstä on tehty kuva samoin kuin antureiden signaalin taajuussisällöstä. Aikatasossa laskettu viivakuorma on ensin muunnettu taajuustason spektri jokaisessa lasketussa poikkileikkauksessa ja tämän jälkeen spektrit ovat yhdistetty yhdeksi kuvaksi, jossa pystyakselilla on taajuus ja vaak akselilla on konstruktiokaarisijainti (Kuva 40). Esitetty taajuusväli on edelleen $0,6 - 1,4$ Hz.

Aallokon kohtaamisspektri on esitetty viivakuorman spektrin yläpuolella helpottamaan vertailua aaltospektrin ja kuormituksen-spektrin välillä (Kuva 40). Aallokon spektrin esitetty taajuusväli on $0-1,4$ Hz. Aallokon kohtaamisspektristä on etsitty spektrin maksimikohdan taajuus eli kohtaamistaajuuden piikkitaajuus f_0 ja merkattu viivakuorman kuvaan tämän taajuuden monikerrat, jotka osuvat välille $0,6-1,4$ Hz. Kapeampi aallokon spektri saattaa aiheuttaa kapeamman kuormitusspektrin kun taas leveämpi spektri saattaa aiheuttaa leveämmän kuormitusspektrin.



Kuva 40. Aallokon kohtaamisspektri ylempi kuva ja pystysuuntaisen viivakuorman taajuussisältö alempi kuva. Alemman kuvan oikeaan yläreunaan on merkitty tehospektrin maksimiarvo S_{xx_m} . $H_s=2,0 \text{ m}$ ja $\beta=160 \text{ deg}$.

Poikittaissuuntaisesta viivakuormasta on muodostettu samanlainen kuva taajuustasossa kuin pystysuuntaisestakin Pysty- ja poikittaissuunnan viivakuorman taajuussisällön kuvat ovat lähes identtiset. Ainoana erona on pystysuunnan suuremmat arvot kaarivälillä 16-18 samassa suhteessa kuin kuvan 39 pysty- ja poikittaissuunnan tehollisilla arvoilla. Jokaisen analysoidun tapauksen pystysuuntaisen viivakuorman taajuussisällön kuvat ovat liitteessä A.

Taajuussisällön kuvat auttavat löytämään kohtia rungosta, jossa suurempien taajuuskomponenttien kuormitus on voimakkainta. Nämä kuvat eivät kuitenkaan kerro kuormituksen vaiheesta mitään, etuviistossa aallokossa aalto etenee rungolla keulasta perään päin ja samoin kuormituspiikki osuu eri aikana eri kohdille runkoa.

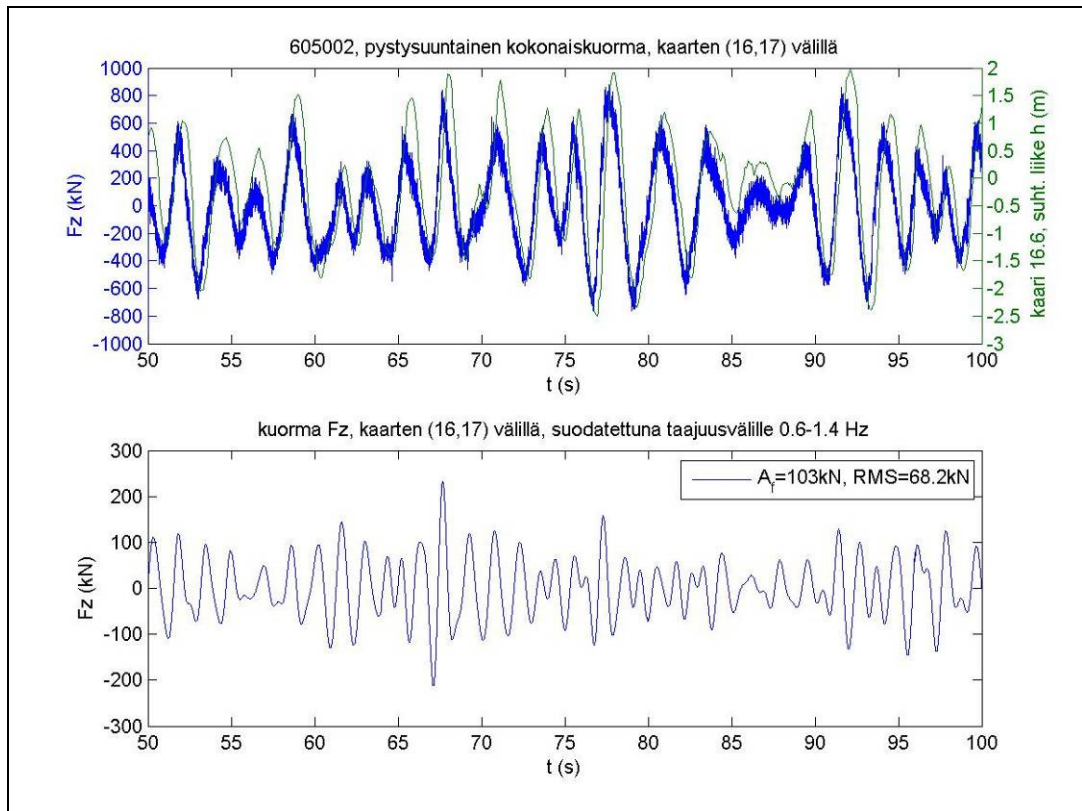
6.4 Kokonaiskuorma

Viivakuorman tehospektrin kuvista voidaan päätellä alue, jolle toisen tai suurempien kertalukujen kuormitus on voimakkainta. Tälle alueelle voidaan laskea kokonaiskuorma sekä pysty- että poikittaissuuntaan integroimalla viivakuormaa pituuden yli. Oleellista kokonaiskuorman suuruuden kannalta on kuinka pitkän alueen yli kuorma lasketaan. Aallon harja ei osu samanaikaisesti koko keulan alueelle, kuten kuvasta 36 voidaan huomata. Kokonaisvoiman laskenta koko alueen yli ei tuota suurinta kokonaisvoimaa, sillä tälle matkalle mahtuu aallon harja ja laakso, jolloin laakson laskeminen mukaan vähentää kokonaisvoimaa. Korkeammat taajuuskomponentit putoavat pois kokonaisvoimasta, mitä pidemmälle alalle voima lasketaan, koska kuormituksen piikki osuu eriaikaisesti eri rungon kohdille.

Lasketaan kaikille analysoiduille tapauksille kokonaiskuorma samalta kaariväliltä, jotta nämä kuormitukset olisivat vertailukelpoisia keskenään. Kuva 41 esittää pystysuuntaisen kokonaiskuorman aikatasossa. Ylemmässä kuvassa on pystysuuntainen kokonaiskuorma sinisellä ja suhteellisen liikkeen anturin signaali vihreällä kaaren nro 16.6 kohdalta.

Alemmassa kuvassa on piirretty sama kokonaiskuorma suodatettuna. Kokonaisvoimasta on alemmassa kuvassa suodatettu pois alle 0.6 hertsin taajuudet sekä yli 1.4 hertsin taajuudet. Tältä taajuusväliltä on laskettu kokonaisvoiman

tehollinen amplitudi A_f kuormituksen tehospektristä. Suodatetulle kokonaiskuormalle on lisäksi laskettu RMS arvo. Sekä suodatuksessa että tehospektrin laskennassa on käytetty Hanning-ikkunointia ikkunan pituuden ollessa 32 sekuntia. Kaikista analysoiduista tapauksista on tehty kuvat kokonaisvoimasta ja suodatetusta kokonaisvoimasta ajan funktiona aikaväliltä 50–100 s (Liite A).



Kuva 41. Ylempi kuva: Pystysuuntainen kokonaiskuorma (sininen kuvaaja) integroituna viivakuormasta kaarivälille 16–17 ja suhteellisen liikkeen signaali kaarelta nro 16.6, (vihreä kuvaaja). Alemmassa kuvassa pystysuuntainen kuorma päästösuodatettuna taajuvälille 0,6 – 1,4 Hz. Suodatetusta kuormasta laskettu tehollinen amplitudi A_f ja RMS arvo. $H_S=2,0$ m ja $\beta=160$ deg.

7 Mittausten analysointi ja tulokset

Analysoitaviksi valittiin 16 eri tapausta, neljä eri aallokkoa ja neljä eri kohtaamiskulmaa. Pienin analysoitu merkitsevä aallonkorkeus oli 1,4 metriä ja suurin 3,4 metriä. Analysoitujen tapausten kohtaamiskulmat vaihtelivat vasta-aallokosta, 180 astetta, sivuvastaiseen aallokkoon 120 astetta asti. Mittausajoja oli ajettu myös 3,9 metrin merkitsevälle aallonkorkeudelle, mutta näitä ei tässä analysoitu, sillä suuremmilla aallon korkeuksilla aallokon taajuus on pienempi ja siten myös kohtaamistaajuus on pienempi. Valitulle tarkasteltavalle kuormituksen taajuusvälille 0,6 – 1,4 Hz ei olisi tällä suurimmalla aallonkorkeudella osunut kuin kohtaamistaajuuden neljännen asteen kuormia. Eri aallokko–kohtaamiskulma tapauksista oli ajettu useita mittausajoja. Joistakin tapauksista on tehty kahdesta mittausajosta antureiden taajuussisällön kuvat ja huomattu näiden olevan hyvin samanlaiset, joten on päätetty, että muista tapauksista riittää vain yhden ajon mukaan ottaminen analysointiin.

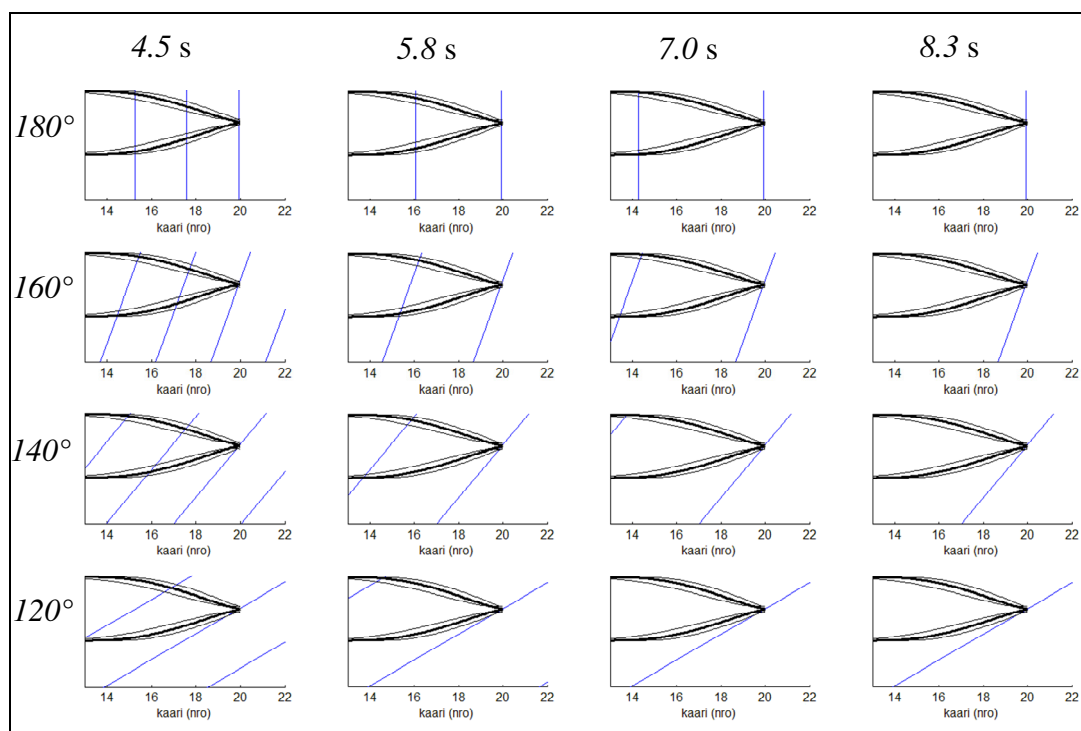
Taulukkoon 1 on listattu analysoitujen tapausten teoreettiset kohtaamistaajuudet laskettuna yhtälön (2-22) mukaan.

Taulukko 1. Analysoitujen ajojen kohtaamistaajuudet f_E (Hz). Ajonopeus $V=22$ kn.

| heading (deg) | Hs(m) 1,4 | Tp(s) 4,5 | Hs(m) 2,0 | Tp(s) 5,8 | Hs(m) 2,8 | Tp(s) 7 | Hs(m) 3,4 | Tp(s) 8,3 |
|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|
| 180 | 0,58 | | 0,39 | | 0,29 | | 0,23 | |
| 160 | 0,56 | | 0,37 | | 0,28 | | 0,22 | |
| 140 | 0,50 | | 0,34 | | 0,26 | | 0,20 | |
| 120 | 0,40 | | 0,28 | | 0,22 | | 0,17 | |

Kohtaamistaajuudet, jotka ovat laskettuna taulukossa, ovat modaalitaajuuden kohtaamistaajuuksia. Epäsäännöllisessä aallokossa ei ole yhtä kohtaamistaajuutta vaan eripituisten aaltojen kohtaamistaajuudet vaihtelevat. Modaalitaajuudella kohdatut aallot ovat kuitenkin epäsäännöllisen aallokon suurimmat komponentit. Piirretään eri tapausten modaalitaajuuden aalloon harjat yhteen kuvaan keulan vesiviivojen kanssa (Kuva 42). Tästä voidaan nähdä kuinka eri tapauksissa aallon harja osuu kyljelle. Pienemmillä ja lyhyemmillä aalloilla keulasta olkapäähän osuu useampi aallon harja vasta-aallokon tapauksessa. Kun kohtaamiskulma pienenee, jolloin aalto kohtaa laivan enemmän sivulta päin, keulan alueelle osuu vain yksi

aallon harja kerrallaan. Kohtaamiskulmalla 120 astetta, aallon harja osuu lähes samanaikaisesti pitkälle matkalle keulasta olkapäähän.



Kuva 42. Aallokon harjat eri kohtaamiskulmilla ja aallokon periodeilla. Laivan keulan konstruktiovesiviiva on piirretty paksummalla ja vesiviivat KVV:n ylä- ja alapuolella korkeudelta $0.01 \cdot L_{PP}$ on piirretty ohuemmalla viivalla..

7.1 Laivan liikkeit: jyskintä ja kohoilu

Osa runkoon kohdistuvasta kuormasta saattaa johtua laivan liikkeistä, pääasiassa kohoilusta ja jyskinnästä. Otetaan tarkasteluun mitatut kohoilun ja jyskinnän signaalit. Selvitetään mitattu kohoilun amplitudi keskimäärin, sekä jyskinnän keskimäärin aiheuttama pystysuuntainen liike laivan keulalla. Laskettiin RMS arvo kohoilun ja jyskinnän signaalista muutamille ajoille. Tässä on oletettu, että laivan painopiste olisi pituussuunnassa laivan keskipisteessä, jolloin laiva jyskisi tämän pisteen ympäri. Todellisuudessa laivan painopiste on todennäköisesti hieman taaempänä, mutta tämä antaa silti hyvän arvion liikkeiden suuruudesta. Jyskinnän pystysuuntainen amplitudi metreinä keulalla saatiin näin kertomalla puolilaivan pituudella jyskinnän kulman sini.

Taulukko 2. Kohoilu ja jyskinnän RMS arvot metreinä keulalla

| Kohtaamis- kulma | Merkitsevä aallonkorkeus Hs | | | |
|---------------------|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | 1,4 m | 2 m | 2,8 m | 3,4 m |
| 180 deg | - | - | - | - |
| 160 deg | 0,01 / 0,05 | 0,02 / 0,01 | 0,02 / 0,07 | 0,05 / 0,11 |
| 140 deg | 0,01 / 0,05 | 0,01 / 0,05 | - | 0,07 / 0,16 |
| 120 deg | - | - | - | - |

Taulukkoon 2 on listattu seitsemän eri tapauksen kohoilun ja jyskinnän RMS arvot. Sekä kohoilun että jyskinnän RMS arvot kasvavat kun merkitsevä aallonkorkeus kasvaa. Suurimmat arvot ovat 140 asteen kohtaamiskulmalla 3,4 metrin merkitsevällä aallonkorkeudella, jolloin kohoilun RMS arvo on 0,07 m ja jyskinnän RMS arvo keulalla on 0,16 m. Jyskinnän, jonka amplitudi on suurempi, arvo on 5 % merkitsevästä aallonkorkeudesta. Nämä liikkeet ovat hyvin pieniä. Mallimittakaavassa näin pieniin arvoihin liittyy suhteessa suurempi mittausepätaarkkuudesta johtuva virhe. Johtuen laivan liikkeiden pienistä arvoista suhteellisiin liikkeisiin nähden, voidaan laivan liikkeitä mittauksissa käytetyillä merkitsevillä aallonkorkeuksilla pitää merkityksettöminä. Laivan liikkeitä ei oteta mukaan analyysiin.

7.2 Viivakuorman vertailu

Kaikkien tapausten pystysuuntaisten viivakuormien tehospektrit on esitetty kuvassa 43. Samat kuvat suuremmassa koossa löytyvät liitteestä A. Kuvan 43 tarkoitus on helpottaa eri tilanteiden vertailua. Kuormitusten suuruusluokkaa ei tämän kuvan perusteella voi arvioida. Sen sijaan vertailu saman aallokon eri kohtaamiskulmien tai saman kohtaamiskulman eri aallonkorkeuksien välillä on mahdollista. Kaikkien kuvien tehospektrien skaalaus on sama. Aaltospektrien skaalaus ei tosin ole sama eri tapausten välillä, mutta aaltospektristä voidaan nähdä spektrin muoto. Aaltospektrit ovat kohdattuja aaltospektrejä, saman aallokon kohdattu aaltospektri ei siten ole samannäköinen eri kohtaamiskulmilla, vaan spektrin piikki siirtyy vasemmalle päin kohtaamiskulman pienentyessä.

Eri aallonkorkeus – kohtaamiskulma tapauksissa tarkasteltavalle taajuusvälille osuvat kohtaamistaajuuden piikkitaajuuden monikerrat on merkitty taulukkoon 3. Kohdatun aaltospektrin piikkitaajuus f_0 ei ole täysin sama kuin aallokon ilmoitetun

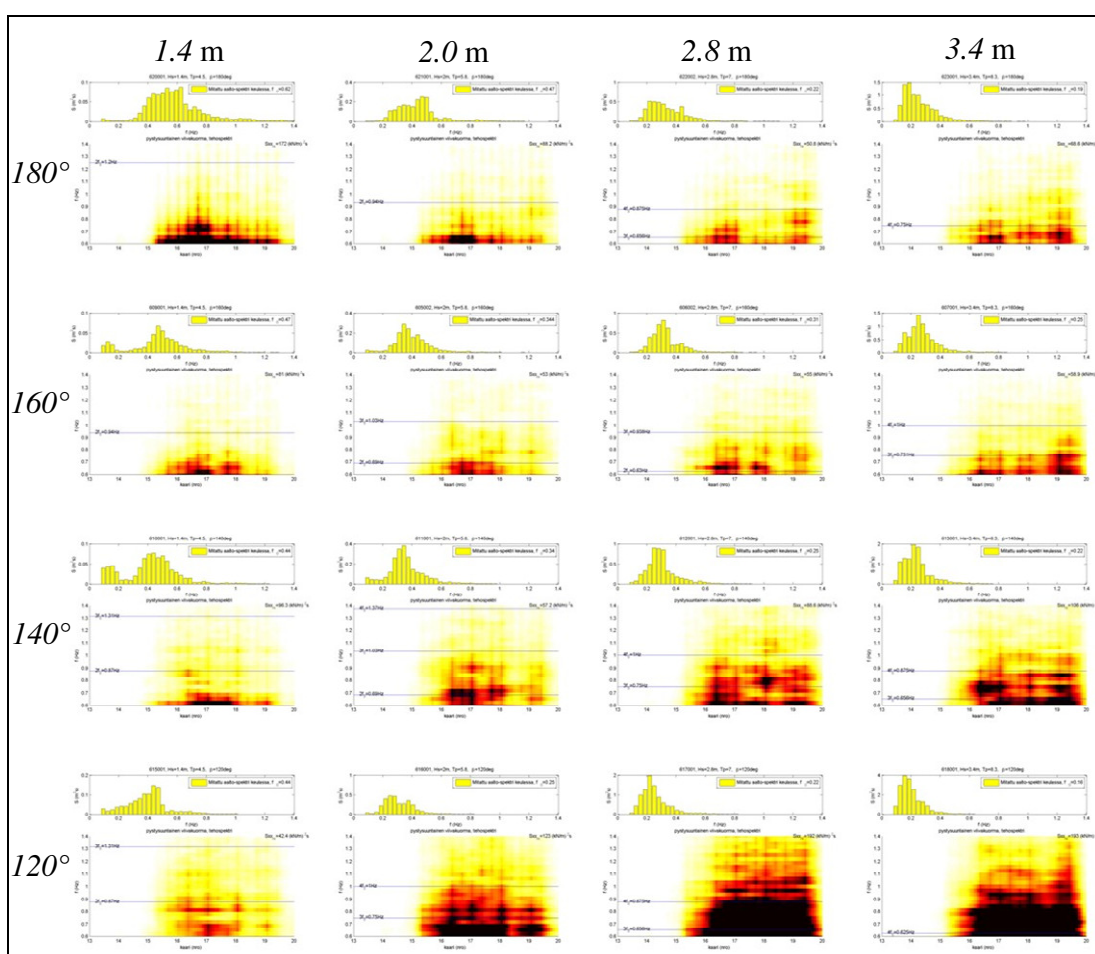
modaaliperiodin T_p mukaan laskettu kohtaamistaajuus. Erot eivät kuitenkaan ole suuria. Kuvan 43 kuviin on merkitty kohdatun aaltospektrin piikkitaajuuden kertaluvut sinisellä vaakasuoralla viivalla.

Taulukko 3. Taajuusvälille 0,6 – 1,4 Hz osuvat kohtaamistaajuuden monikerrat.

| Heading (deg) | $H_s=1.4\text{m}$ $T_p=4.5\text{s}$ | $H_s=1.4\text{m}$ $T_p=4.5\text{s}$ | $H_s=1.4\text{m}$ $T_p=4.5\text{s}$ | $H_s=1.4\text{m}$ $T_p=4.5\text{s}$ |
|------------------|--|--|--|--|
| 180 | 1, 2 | 2 | 3, 4 | 4 |
| 160 | 2 | 2, 3, 4 | 2, 3, 4 | 3, 4 |
| 140 | 2, 3 | 2, 3, 4 | 3, 4 | 3, 4 |
| 120 | 2, 3 | 3, 4 | 3, 4 | 4 |

Kuvan 43 vasemmassa sarakkeessa ovat pienimmän merkitsevän aallonkorkeuden, $H_s=1,4$ m, tapaukset. Ylimmän rivin vasemmassa kuvassa, tapaus $H_s=1,4$ m, $\beta=180$ deg, huomataan ensimmäisen kertaluokan kuormituksen osuvan tarkasteltavalle taajuusvälille. Ensimmäisen kertaluokan kuormitukset ovat huomattavasti suurempia kuin suurempien kertaluokkien kuormitukset, tämän takia kuormitus näyttää pienentyvän kun aallon koko kasvaa. Ylimmän rivin toisessa kuvassa vasemmalta, tapauksessa $H_s=2,0$ m, $\beta=180$ deg, osuu tarkasteltavalla taajuusvälillä toisen ja kolmannen kertaluokan kuormitukset. Tässä kuvassa on kuitenkin edelleen ensimmäisen kertaluokan kuormituksen ”häntä” nähtävissä (kuvat 32 ja 33), johtuen epäsäännöllisestä aallokosta ja taajuusvuotamisesta. Tapauksessa $H_s=2,8$ m, $\beta=180$ deg (kolmas kuva), on kolmannen ja neljännen kertaluokan kuormitusta. Kuvassa alempi viiva merkitsee kolminkertaista kohtaamisspektrin piikkitaajuutta. Tässä kolmannen kertaluokan kuormitus osuu hyvin piikkitaajuuden kohdalle. Tapauksessa $H_s=3,4$ m, $\beta=180$ deg (neljäs kuva ylärivillä) on neljännen kertaluokan kuormitus nähtävissä. Ensimmäisen rivin kuvia tarkasteltaessa vaikuttaa, että tarkasteltavalle taajuusvälille osuva kuormitus olisi samansuuruista vaikka aaltojen korkeus nousee. Suuremmilla aallonkorkeuksilla on pienempi modaalitaajuus, joten kohtaamistaajuuden piikkitaajuuskin on pienempi, tällöin myös kuormituksen kertaluokka kasvaa merkitsevän aallonkorkeuden kasvaessa. Ylimmän rivin kuvissa kuormituksen suurimmat arvot ovat suurin piirtein 16–17 kaaren välissä.

Tarkasteltaessa saman aallokon eri kohtaamiskulmia, on huomattava, että jälleen pienemmillä kohtaamiskulmilla, eli aaltojen kohdatessa laivan sivummalta (kuva 42), kohdatun aaltospektrin piikkitaajuus pienenee. Tällöin tarkasteltavalle taajuusvälille osuvat kuormitukset ovat pienemmillä kulmilla suurempaa kertaluokkaa, ja näin ollen pienempiä. Koska aalto osuu kuitenkin pienemmällä kohtaamiskulmalla kerralla pidemmälle osalle keulaa, näyttää kuvista katsoen, että kuormituksen suuruus pienimmällä aallokolla pysyisi suurin piirtein samanarvoisena. Suuremmilla aallokoilla huomataan, että kohtaamiskulman pienentyessä kuormitus tarkasteltavalla taajuusvälillä vaikuttaa kasvavan.



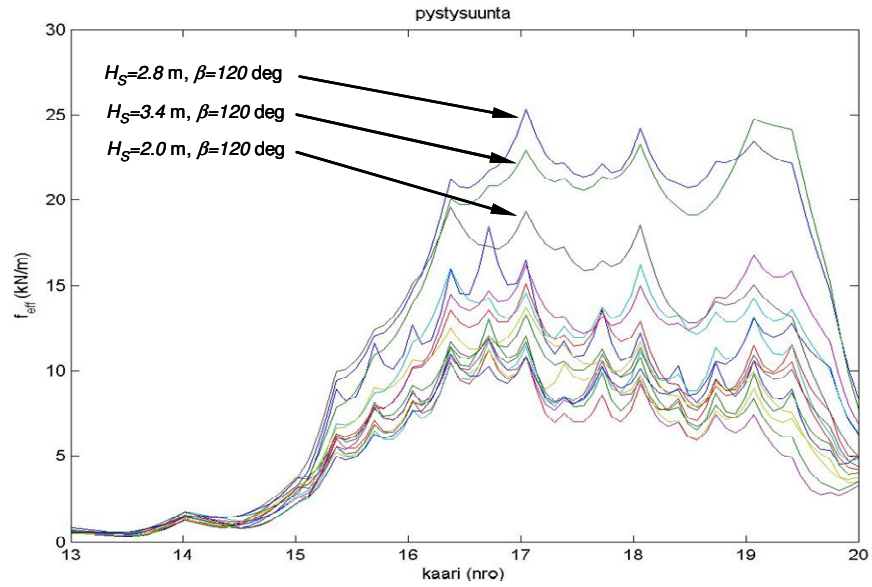
Kuva 43. Pystysuuntaisen viivakuorman tehospektrit kaikista analysoiduista tapauksista. Jokaisen tapauksen aaltospektri laskettuna keulan suhteellisen liikkeen anturin signaalista. Merkitsevät aallonkorkeudet sarakeittain vasemmalta oikealle 1.4m, 2m, 2.8m, 3.4m. Kohtaamiskulmat ylhäältä alaspäin 180 deg, 160 deg, 140 deg, 120 deg.

Viivakuorman tehollinen amplitudi oli esitetty aiemmin yhdelle ajolle kuvassa 39. Piirretään seuraavaksi kaikkien ajojen viivakuorman teholliset amplitudit taajuusväliltä $0,6-1,4$ Hz. Pystysuuntaisen viivakuorman teholliset amplitudit on esitetty kuvassa 44. Tästäkin kuvasta huomataan, että lähes kaikilla ajoilla suurimmat kuormat ovat olleet 16-17 kaaren välillä, tosin kahdella ajolla arvot ovat kaaresta 17 eteenpäin lähes samansuuruisia. Näissä kahdessa ajossa, joilla viivakuorman teholliset arvot ovat kauttaaltaan suuremmat, kohtaamiskulma on ollut 120 astetta ja merkitsevä aallonkorkeus, toisessa $2,8$ metriä ja toisessa $3,4$ metriä.

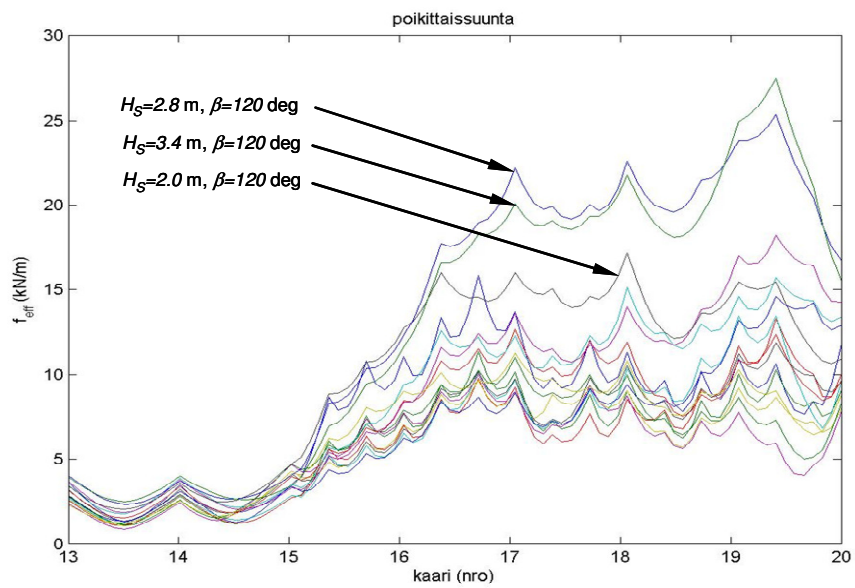
Poikittaissuuntaisen viivakuorman teholliset amplitudit kaikista ajoista ovat piirretty kuvaan 45. Poikittaissuuntaisen viivakuorman kuvaajissa arvot kaarivälillä 16-20 ovat hyvin saman arvoisia. Suurimmat arvot ovat kaarivälillä 19-20.

Kuvassa 46 on vertailtu kuormitusten suhdetta. Pystysuuntainen viivakuorma on jaettu poikittaissuuntaisella viivakuormalla. Vaikka viivakuormien tehollisissa amplitudeissa olikin huomattavia eroja, hajonta kuormituksien suhteissa eri ajojen välillä on hyvin pientä. Kaikissa ajoissa kuormituksien suhteen kuvaajat asettuvat lähes samalle käyrälle. Pysty- ja poikittaissuuntaisten kuormitusten suhde riippuu laidan jyrkkyydestä eli kyljen kaarikulmasta. Kaaren 17 kohdalla kaarikulma on loivimmillaan, joten pystysuuntaisen kuormituksen osuus tällä alueella on suurempi kuin poikittaissuuntaisen.

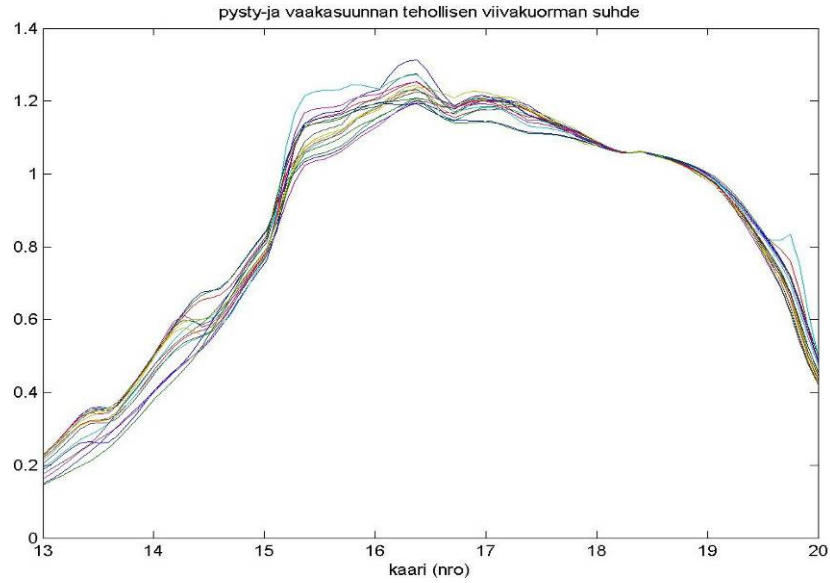
Kuvaan 47 on piirretty kyljen pysty- ja poikittaissuuntaisten normaalikomponenttien suhde konstruktiovesiviivalla. Normaalikomponenttien suhde on myös piirretty pystysuunnassa konstruktiovesiviivaa metrin korkeammalla sijaitsevalla vesiviivalla ja metrin konstruktiovesiviivaa alempana sijaitsevalla vesiviivalla. Kuvassa on lisäksi kuormitusten suhde kaikilta ajoilta. Aivan keulassa kuormitusten suhde on suurempi kuin normaalikomponenttien suhde KVV:lla. Tällä alueella korkeamman vesiviivan normaalikomponenttien suhde on lähempänä kuormitusten suhdetta. Taempana kuormituksien suhde on lähempänä normaalikomponenttien suhdetta konstruktiovesiviivalla ja jopa tätä alempana. Tämän perusteella vaikuttaa, että keulassa kuormitus osuu korkeammalle kuin taaempana. Silti kuormitus osuu korkeussuunnassa, tämän kuvan perusteella, vain noin 2 metrin korkuiselle alueelle.



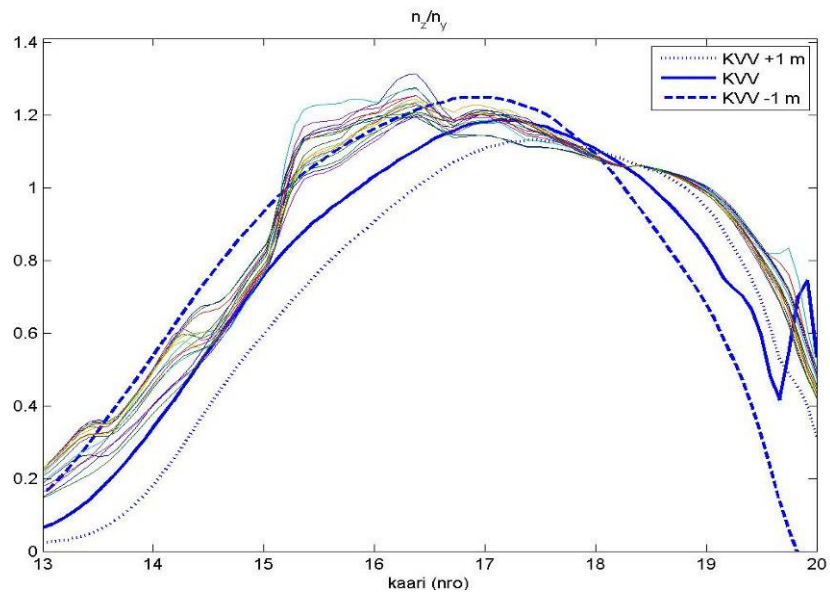
Kuva 44. Pystysuuntaisen viivakuorman teholliset amplitudit kaikista ajoista taajuuksväliltä 0,6-1,4 Hz.



Kuva 45. Poikittaissuuntaisen viivakuorman teholliset amplitudit kaikista ajoista taajuuksväliltä 0,6-1,4 Hz.



Kuva 46. Pysty- ja poikittaissuuntaisen viivakuorman suhde.



Kuva 47. Pysty- ja poikittaissuuntaisen kyljen normaalikomponenttien suhde KVV:lla sekä pystysuunnassa metrin KVV:n yläpuolella sijaitsevan vesiviivan korkeudella että metrin KVV:n alapuolella sijaitsevan vesiviivan korkeudella.

Kuormitusten suhteen ja normaalikomponenttien suhteen vertailu verifioidi myös viivakuorman laskentamenetelmää. Kuormitus aiheutuu paineesta, jolloin voiman komponentteja laskettaessa paine jakautuu kaarikulman mukaan pysty- ja poikittaissuuntaiseen komponenttiin. Kuormitusten suhteen ja kaarikulmien suhteen välinen hyvä korrelaatio kertoo voiman laskennan menetelmän toimivuudesta.

7.3 Paineiden vertailu

Kuvan 43 kaikkia tapauksia tarkasteltaessa huomataan, että suurimmat kuormitukset ovat kaarivälillä 16–18. Paitsi kohtaamiskulmalla 120 astetta, aallonkorkeuksilla 2,8 ja 3,8 metriä, jolloin myös kaaren 18 etupuolet on suuria kuormituksia. Kaarivälillä 16–18 on pystysuunnassa eniten antureita (Kuva 12). KVV:n yläpuolista riviä seuraavalla anturirivillä takimmainen anturi sijaitsee kaarella nro 16.3, kun taas KKV:n alapuolisella anturirivillä etummainen anturi sijaitsee kaarella 18. Anturialueen ulkopuolet paineelle on interpoloitu asetettu arvoksi nolla. Tästä saattaa johtua että viivakuormalle on saatu suurempia arvoja kaarivälillä 16–18.

Tarkastellaan pelkkiä painesignaaleita, jotta voidaan todeta johtuuko suurempien voimien esiintymien tällä välillä suuremmasta anturimäärästä kyseisellä välillä, vai mahdollisesti jostain muusta. Jokaisen paineanturin signaalista on laskettu tehospektri taajuusvälille 0,6–1,4 Hz. Antureiden tehospektrien kuvat kaikille ajoille ovat liitteessä A. Jotta eri ajojen antureiden painekuormituksen suuruutta olisi helpompi verrata, on paineantureiden signaaleista laskettu taajuusvälin 0,6–1,4 Hz tehollinen amplitudi. Jokaisen anturirivin tehollisista amplitudeista on piirretty käyrä. Kuvaajan vaaka-akselilla on anturin kaarisijainti ja pysty-akselilla tehollisen amplitudin arvo, samaan kuvaajaan on piirretty kaikkien analysoitujen ajojen käyrät. Analysoituja ajoja on 16 kpl, joten jokaisessa kuvassa on 16 käyrää.

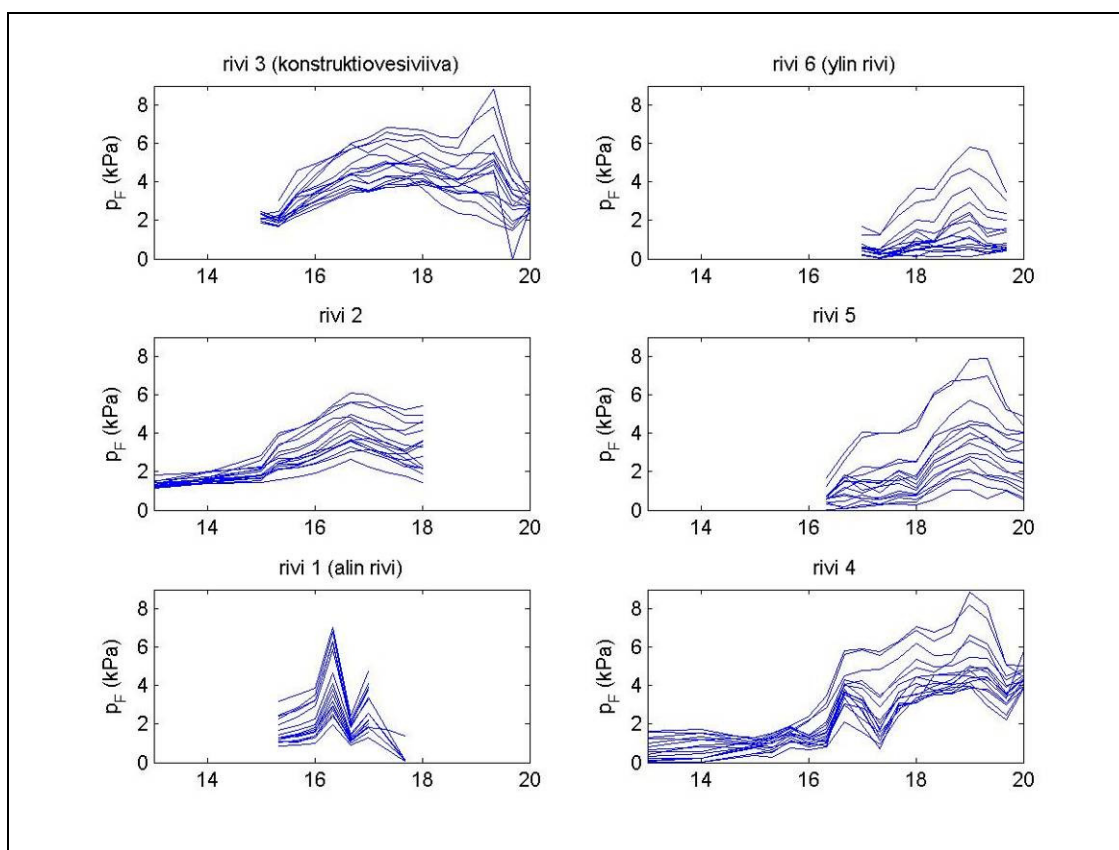
Tarkastellaan aluksi KVV:n antureiden tehollisia amplitudeja (kuvan 48 vasen yläreuna). Kuvaajat näyttävät olevan hyvin samanmuotoisia. Paineen tehollisen amplitudin arvot kaarella 15 ovat kaikissa ajoissa lähes samaa luokkaa. Arvot kasvavat eteenpäin mentäessä ja ovat suurimmalla osalla ajoja suurimmat noin 17–18 kaaren kohdalla. Useilla ajoilla on myös piikki kaaren 19.3 kohdalla. Aivan keulaan mentäessä kaaren 20 kohdalla arvot jälleen pienenevät.

KKV:n alapuolisella anturirivillä, rivi 2 (kuvassa 48 keskimäinen kuva vasemmalla), pienimmät arvot ovat 13. kaarella ja suurimmat kaarella 16.6. Alimmalla rivillä, rivi 1 (kuvassa 48 alin kuva vasemmalla), arvoissa on piikki kaaren 16.3 kohdalla. Piikki vaikuttaa virheeltä anturin kalibroinnissa, tässä kohdassa sijainneella anturilla on mahdollisesti ollut liian suuri kalibroitikerroin.

Rivillä 4, KVV:n yläpuolinen anturirivi (kuvassa 48 alin kuva oikealla), arvot ovat pieniä kaaren 16 takapuolella. Kaarisijainnin 16.3 etupuolella arvot alkavat kasvaa, kun taas useilla ajoilla kaaren 17.3 kohdalla on arvoissa notkahdus, muutoin arvot kasvavat kaarisijaintiin 19 asti, jossa ne ovat suurimmat.

Kahdella ylimmällä rivillä, rivit 5 ja 6 (kuvassa 48 kaksi ylintä kuvaa oikealla), käyrät ovat hyvin samantyyppisiä kuin rivillä 4, lukuun ottamatta notkahdusta rivillä 4. Ylimmillä riveillä käyräparven arvoissa on enemmän hajontaa, johtuen siitä, että pienemmillä aalloilla veden pinta ei ole aina noussut ylimmille antuririveille asti.

Kuvan 48 perusteella vaikuttaa, että suuremmat viivakuorman arvot kaarivälillä 16–18 eivät johdu pelkästään suuremmasta määrästä antureita, vaan myös paineen arvot ovat olleet suuremmat tällä välillä. Tässä siis puhutaan taajuuksien $0,6\text{--}1,4\text{ Hz}$ tehollisista paineen arvoista, ei yksittäisten painepiikkien arvoista



Kuva 48. Painesignaalien teholliset amplitudit taajuuksiltaan $0,6\text{--}1,4\text{ Hz}$. Jokaisen anturirivin käyräparvet kaikista analysoiduista ajoista.

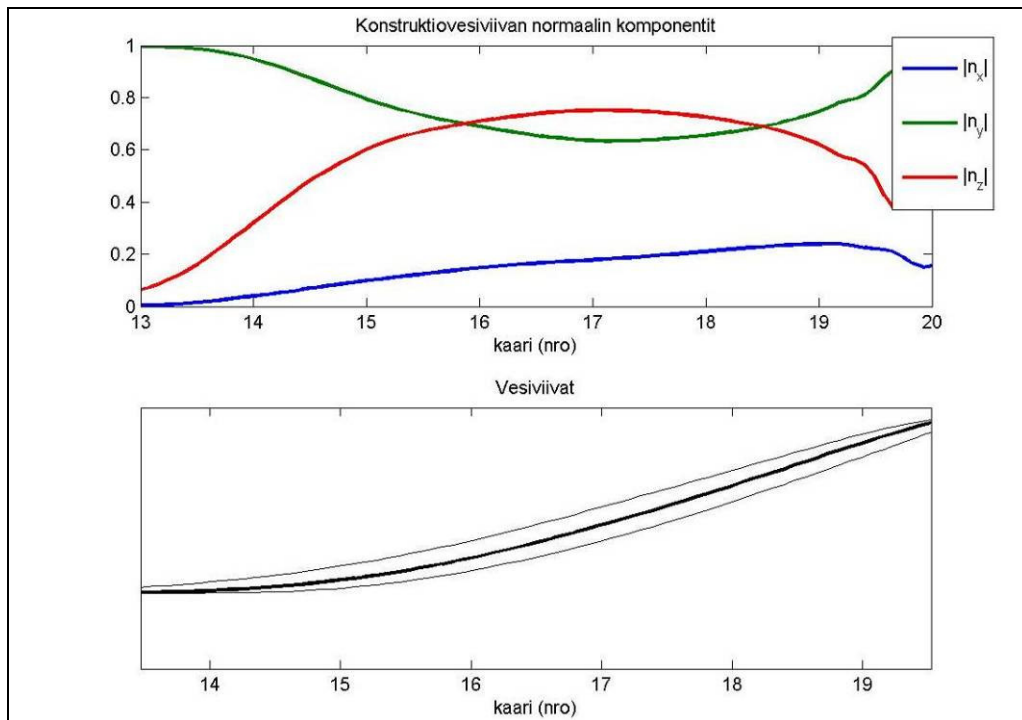
Antureiden painesignaaleiden vertailu olisi jossain määrin selkeämpää, jos saman rivin anturit sijaitsisivat samalla korkeudella. Tämä olisi myös yksinkertaistanut paineen interpolointia. Konstruktiovesiviivan alapuolisella rivillä, rivi 2, vaikuttaa vielä olevan varteenotettavia paineen arvoja kaaren 18 etupuolella, joten olisi ollut syytä asentaa antureita kaaren 18. etupuolelle kyseisellä rivillä. Muutoin antureiden sijoittelu oli onnistunut, sillä kaikilta eri korkeuksilta on tullut mitattua suurimman tehollisen amplitudin kohta.

Tässä vaiheessa on hyvä vertailla paineen arvoja rungon muotoon, lähinnä vesiviivan muotoon ja sen normaalikomponenttien arvoihin. Kuva 49 esittää keulan alueelta konstruktiovesiviivan normaalikomponenttien suuruudet. Alemmassa kuvassa on piirretty konstruktiovesiviiva sekä vesiviivat konstruktiovesiviivan ylä- ja alapuolelta. Rivin 2 anturit sijaitsivat suurin piirtein kuvan alemmalla vesiviivalla ja rivin 3 anturit sijaitsivat suurin piirtein konstruktiovesiviivan yläpuolisella vesiviivalla. Ainoastaan KVV:n anturit olivat asennettu pystysuunnassa samalle korkeudelle. Muiden rivien antureiden pystysuuntainen korkeussijainti ei ollut vakio.

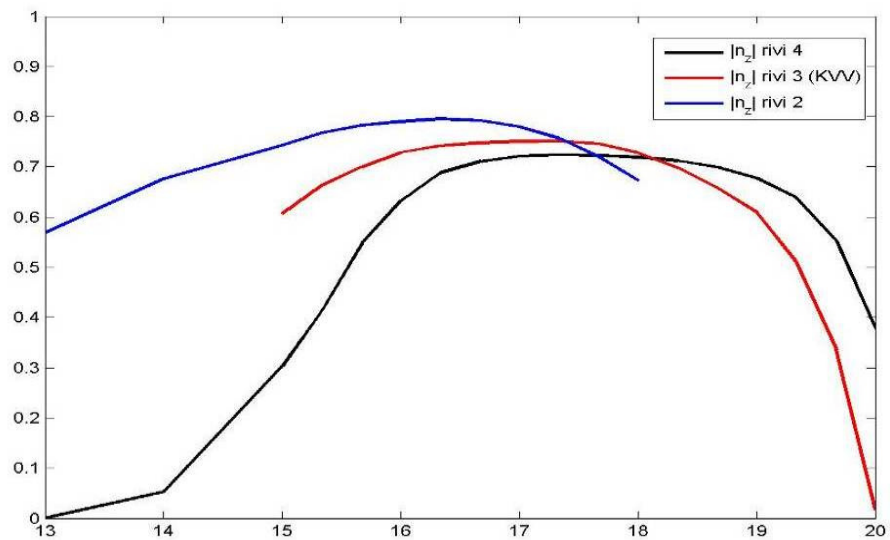
Painesignaalien teholliset arvot taajuusvälillä $0,6\text{--}1,4$ Hz (kuvan 48 vasen yläreuna) vaikuttaisivat olevan jossain määrin samanmuotoisia kuin konstruktiovesiviivan pystysuuntaisen normaalikomponentin kuvaaja (Kuva 49, ylempi kuva). Piirretään vielä kyljen normaalin pystysuuntaiset komponentit antureiden kohdalla konstruktiovesiviivalla (rivi 3) sekä tämän ala- ja yläpuolisella anturirivillä (Kuva 50).

Alimmalla rivillä normaalin pystysuuntaiset komponentit ovat suurimmillaan n. kaaren 16.5 kohdalla. Konstruktiovesiviivalla pystysuuntaisen normaalin suuremmat arvot ovat edempänä ja tätä ylemmällä rivillä vielä edempänä kaarivälillä 16.5–19. Kuvan 48 paineen tehollisen amplitudien käyräparvista eri ajoilla huomataan tällainen samantyyppinen kuvio. Kuormituksen suuremmat arvot ovat edempänä ylemmillä antuririveillä. Kyljen kaltevuudella vaikuttaa olevan yhteys mitattuihin paineen arvoihin. Mitä pystysuorempi on kyljen kaarikulma, sitä pienempiä ovat painekuormituksen suurempien kertalukujen komponentti. Tämän perusteella ei voi sanoa onko kaarikulmalla vaikutusta painekuormituksen ensimmäiseen

komponenttiin, sillä painesignaalista on pyritty eliminoimaan ensimmäisen kertaluvun kuormitus.



Kuva 49. Keulan alueen konstruktiovesiviivan normaalien komponentit, n_z on normaalin pystysuuntainen komponentti. Alemmassa kuvassa vesiviivat korkeusvälein $0.005 \cdot L_{PP}$. KVV on merkitty paksummalla viivalla.



Kuva 50. Normaalin pystysuuntaiset komponentit eri antuririveillä. Rivi 4 on konstruktiovesiviivan yläpuolinen rivi, rivi 3 on KVV ja rivi 2 on konstruktiovesiviivan alapuolinen rivi.

7.4 Kokonaisvoiman vertailu

Kokonaisvoiman komponentit pysty- ja poikittaissuuntaan integroitiin pysty- ja poikittaissuuntaisesta viivakuormasta kaariväliltä 16–17. Tämän jälkeen kokonaisvoimasta on laskettu efektiivinen amplitudi taajuuksväliltä 0,6–1,4 Hz. Kokonaisvoiman arvoja tarkasteltaessa on huomioitava, että kokonaisvoima on vain toisella kyljellä, tietyllä rajoitetulla alueella vaikuttava kokonaisvoima. Vastaallokon tapauksessa koko laivaan vaikuttava pystysuuntainen kokonaisvoima kaksinkertaistuu ja poikittaissuuntainen kokonaisvoima häviää, molemmilla kyljillä vaikuttavien voimien summautumisen takia. Aallokon ollessa sivuvastaista koko laivaan vaikuttavasta voimasta ei voida sanoa mitään näiden mittausten perusteella, sillä aallokon katvepuolella painetta ei ollut mitattu. Mitä pidemmästä aallokosta on kyse, sitä vähemmän aalto heijastuu, jolloin aalto kulkee laivan läpi ja katvealueellakin aallon korkeus on huomattava. Toisaalta katvealueen puolella aallon harjan ja laivan kyljen välinen nopeus on pienempi ja tällöin voimakin tällä puolella on huomattavasti pienempi. Tässä puhutaan siis rajoitetun alueen voiman tehollisesta amplitudista taajuuksvälillä 0,6 -1,4 Hz kokonaisvoimana

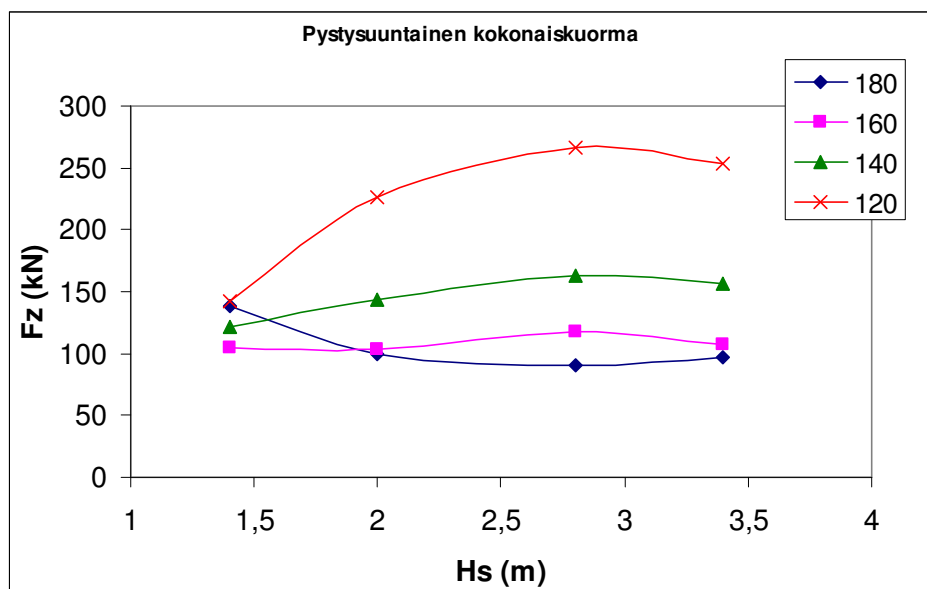
Tarkasteltavalle taajuuksvälille osuu tapauksessa $H_S=1,4$ m, $\beta=180$ deg, ensimmäisen ja toisen kertaluokan heräte. Muissa tapauksissa taajuuksvälille osuva heräte on toista tai korkeampaa kertaluokkaa. Tapauksessa $H_S=3,4$ m, $\beta=120$ deg, heräte on enää neljättä kertaluokkaa. Kokonaisvoiman tehollisen amplitudin arvot sekä pysty- että poikittaissuuntaan on listattu taulukkoon 4. Jokaiselle tapaukselle ylempi arvo on pystysuuntainen kokonaisvoima, alempi arvo on poikittaissuuntainen kokonaisvoima. Tapauksille on myös kirjoitettu minkä kertaluokan heräte osuu taajuuksvälille 0,6-1,4 Hz. Kaikille tapauksille tällä kaarivälillä pystysuuntainen kokonaisvoima on 1,2 kertaa suurempi kuin poikittaissuuntainen voima. Se on sama kuin pysty- ja poikittaissuuntaisen kyljen normaalivektoreiden suhde konstruktiovesiviivan alapuolella tällä kaarivälillä (Kuva 47).

Taulukko 4. Kaariväli 16–17 pysty- ja poikittaissuuntaisen kokonaisvoiman efektiivinen amplitudi $A_f(kN)$ taajuusväliltä 0,6–1,4 Hz, sekä kuormituksen kertaluokka.

| | | Merkitsevä aallonkorkeus Hs (m) | | | |
|---------------|-----|---------------------------------|--------------|--------------|-----------|
| | | 1,4 | 2 | 2,8 | 3,4 |
| Heading (deg) | 180 | 138 | 99 | 90 | 97 |
| | | 116 | 84 | 75 | 81 |
| | | 1.+2.kert | 2.kert | 3.+4.kert | 4.kert |
| | 160 | 105 | 103 | 118 | 107 |
| | | 88 | 86 | 97 | 85 |
| | | 2.kert | 2.+3.+4.kert | 2.+3.+4.kert | 3.+4.kert |
| | 140 | 122 | 143 | 163 | 156 |
| | | 101 | 117 | 133 | 129 |
| | | 2.+3.kert | 2.,3.+4.kert | 3.+4.kert | 3.+4.kert |
| | 120 | 142 | 226 | 266 | 253 |
| | | 115 | 187 | 228 | 217 |
| | | 2.+3. kert | 3.+4. kert | 3.+4. kert | 4.kert |

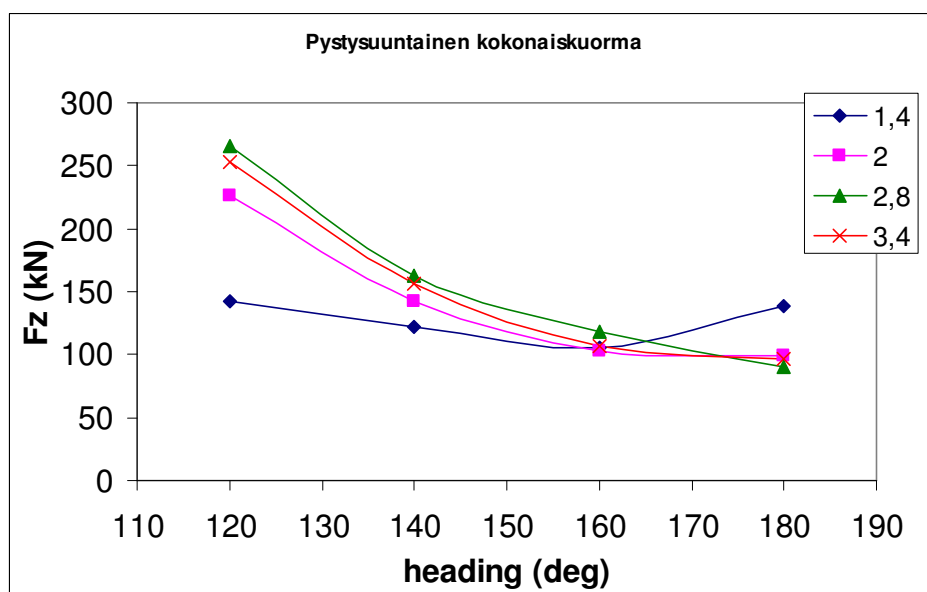
Tarkastellaan aallonkorkeuden vaikutusta kokonaisvoimaan (Kuva 51). Merkitsevällä aallonkorkeudella 1,4 metriä ja kohtaamiskulmalla 180 astetta herätteessä on mukana ensimmäinen kertaluokka, joten tämä arvo on huomattavasti suurempi. Muuten kaikilla kohtaamiskulmilla kokonaisvoima näyttää kasvavan kun aallon korkeus kasvaa. Kun aallon korkeus kasvaa 3,4 metriin tällöin aallon periodi on myös kasvanut sen verran että herätteet ovat enää korkeampaa kertaluokkaa. Joten kokonaisvoimakin on pienempi. Kohtaamiskulmilla 180 ja 160 astetta aallonkorkeuden muutoksella ei ole suurta vaikutusta kokonaiskuorman arvoihin. Näillä kohtaamiskulmilla kuormituksen kertaluku kasvaa tasaisesti aallon korkeuden kasvaessa. Kohdassa 7.2 oli vertailtu viivakuormaa, kyseisen kohdan kuvan 43 eri tapausten kuvia vertaamalla voidaan huomata kuinka kohtaamistaajuuden kertaluku vaikuttaa 160 asteen kohtaamiskulmilla. Tämän kohtaamiskulman pienimmällä aallonkorkeudella 1,4 metriä kuormitus on toista kertaluokkaa, mutta ensimmäisen kertaluvun hännästä aiheutuu suuri osa kuormitusta. Saman kohtaamistaajuuden aallonkorkeudella 2,0 metriä kuormitus on puhtaasti toista, kolmatta ja neljättä kertaluokkaa. Ensimmäisen kertaluokan häntää ei enää ole nähtävissä. Tämä selittäisi sen, ettei kokonaisvoima kasva aallonkorkeuden noustessa 1,4 metristä 2,0 metriin. Edelleen 160 asteen kohtaamiskulmalla aallonkorkeudella 2,8 metriä kuormitus on toista, kolmatta ja neljättä kertaluokkaa. Tällöin kokonaisvoima kasvaa hieman aallonkorkeuden noustessa 2,0 metristä 2,8 metriin. Lopulta aallonkorkeuden ollessa 3,4 metriä 160 astetta kohtaamiskulmalla kuormituksen toinen kertaluokka on

tippunut pois ja mukana on enää kolmas ja neljäs kertaluokka, joten kokonaisvoimakin on pienentynyt.



Kuva 51. Aallonkorkeuden vaikutus kokonaisvoimaan.

Vertailtaessa kohtaamiskulman vaikututusta kokonaisvoimaan voidaan nähdä selvempi trendi. Kaikilla tapauksilla kokonaisvoima pienenee kun kohtaamiskulma suurenee eli kun käännetään sivuvastaisesta aallokosta vasta-aallokkoon (Kuva 52). Jälleen voidaan nähdä, että tapauksen $H_s = 1,4$ m, $\beta = 180$ deg arvo ei noudata trendiä.

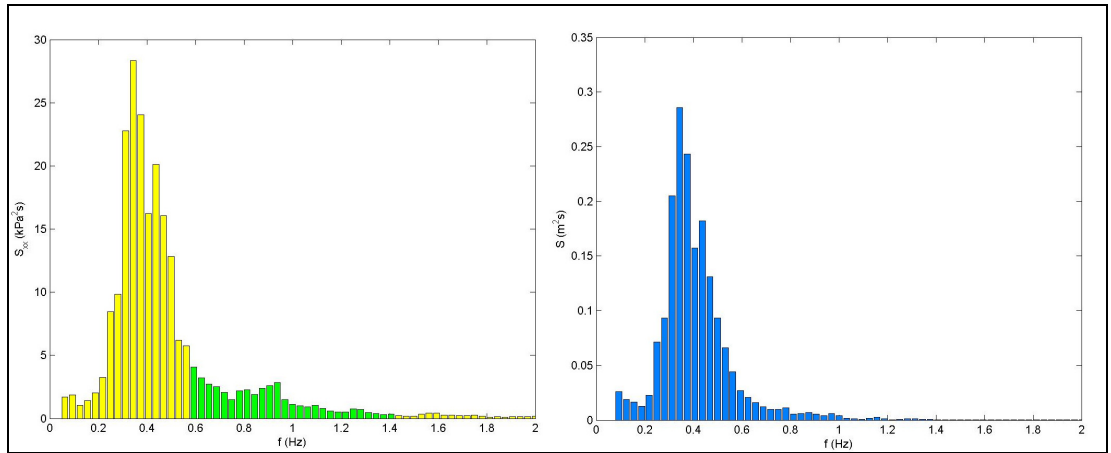


Kuva 52. Kohtaamiskulman vaikutus kokonaisvoimaan.

Vertailtaessa kokonaiskuorman muutosta aallonkorkeuden muutokseen, tärkeimpänä tekijänä on kuormituksen kertaluokka. Kohtaamistaajuuden kertaluokan kasvaessa kuormitus pienenee, kun taas suurempi aallonkorkeus kasvattaa kuormitusta. Aallon korkeutta kasvatettaessa nämä kaksi tekijää vaikuttavat.

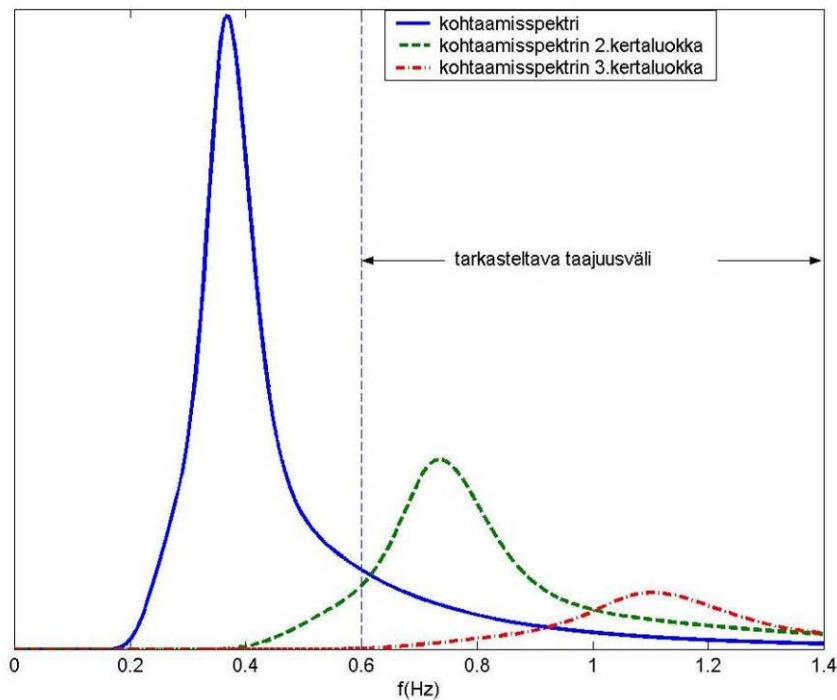
Kun taas tarkastellaan kohtaamiskulman vaikutusta, kokonaisvoima kasvaa kohtaamiskulman pienentyessä kaikissa tapauksissa, paitsi tapauksessa $H_S=1,4$ m, $\beta=180$ deg. Samalla aallonkorkeudella käännyttäessä vasta-aallokosta sivuvastaiseen aallockoon, kuormituksen kertaluku ei kasva yhtä selkeästi. Aallonkorkeudella 1,4 metriä alimmat kuormituksen kertaluokat ovat 1, 2, 2, 2. Aallonkorkeudella 2,0 metriä taas 2, 2, 2, 3. Aallonkorkeudella 2,8 metriä 3, 2, 3, 3 ja aallonkorkeudella 3,4 metriä 4, 3, 3, 4, (Taulukko 4). Aallonkorkeuksilla 2,8 metriä ja 3,4 metriä kertaluokka jopa pienenee välillä. Näin ei kävisi, jos epäsäännöllinen spektri olisi juuri määritellyn spektrin muotoinen, tämä tarkoittaisi kuitenkin käytännössä, että ajojen pitäisi olla hyvin pitkiä.

Kuormituksen kertaluokan vertailu ei ole täysin yksikäsitteistä epäsäännöllisen aallokon tapauksessa. Aallocko sisältää eri taajuuksia sisältäviä komponentteja, joilla on eri aallonkorkeus. Kuormituksen suuruus pienenee kun kertaluokka kasvaa. Oletetaan kuormituksen olevan kohtaamisspektrin muotoinen ja toisen kertaluokan kuormituksen olevan 30 prosenttia ensimmäisen kertaluokan kuormituksesta ja jälleen kolmannen kertaluokan kuormituksen oletetaan olevan 30 prosenttia toisen kertaluokan kuormituksesta. Kuvaan 54 on piirretty kohtaamisspektri, kohtaamisspektrin toinen ja kolmas kertaluokka siten, että suurempi kertaluokka on 30 prosenttia edellisen arvosta. Kokonaiskuormituksen tulisi olla summa näistä kaikista kertaluokista. Todellisuudessa lasketusta kuormituksesta on mahdotonta sanoa, mitkä ovat kertaluokkien suhteet. Ne ovat todennäköisesti lähempänä kymmentä prosenttia kuin 30 prosenttia, riippuen tilanteesta. Ensimmäisen kertaluokan osalta kuormitus on hyvin samanmuotoinen kuin kohdattu aaltospektri. Tämä voidaan todeta verrattaessa erään anturin painekuormituksen tehospektriä ja aaltospektriä samalta ajolta (Kuva 53).



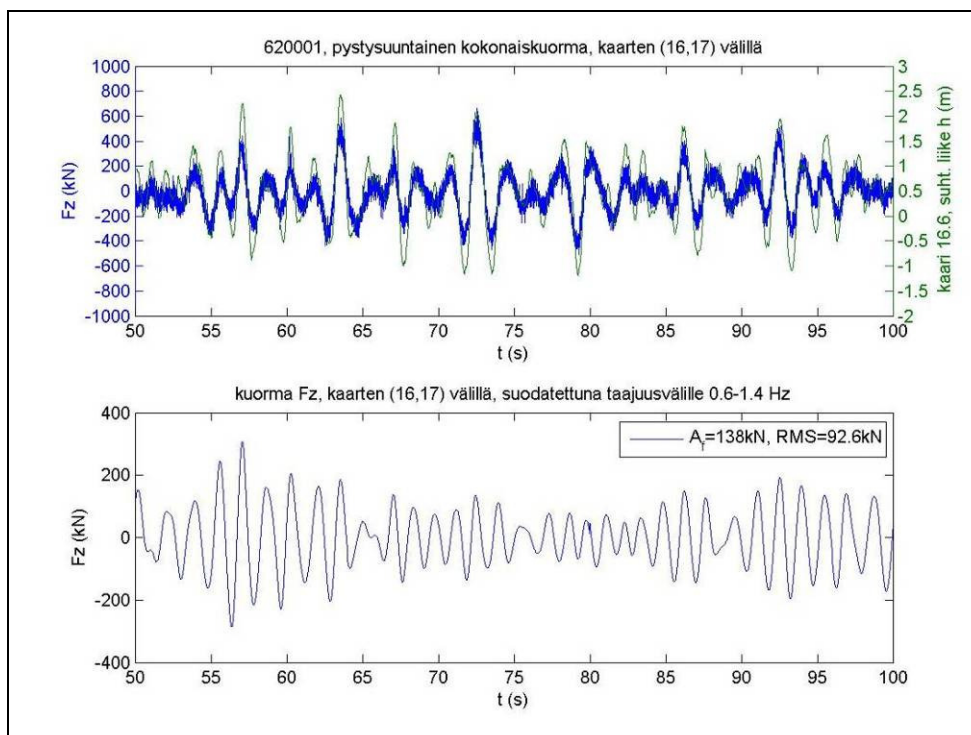
Kuva 53. Vasemmalla paineanturin tehospektri (Kuva 32). Oikealla aallokon kohtaamisspektri (Kuva 33). Molemmat tapauksesta $H_S=2,0$ m ja $\beta=160$ deg.

Kuvan 54 tapauksessa toinen ja kolmas kertaluokka osuvat hyvin selkeästi tarkasteltavalle taajuusvälille, silti ensimmäisen kertaluokan korkeampien taajuuksien osuus hyvin suuri. Tapauksissa, joissa kohtaamistaajuuden tai sen monikerran piikki jää juuri tarkasteltavan taajuusvälin alarajan alapuolelle, ei tätä monikertaa ole luettu kuuluvaksi taajuusvälille, vaikka sen hännän osuus kuormituksesta on suuri.

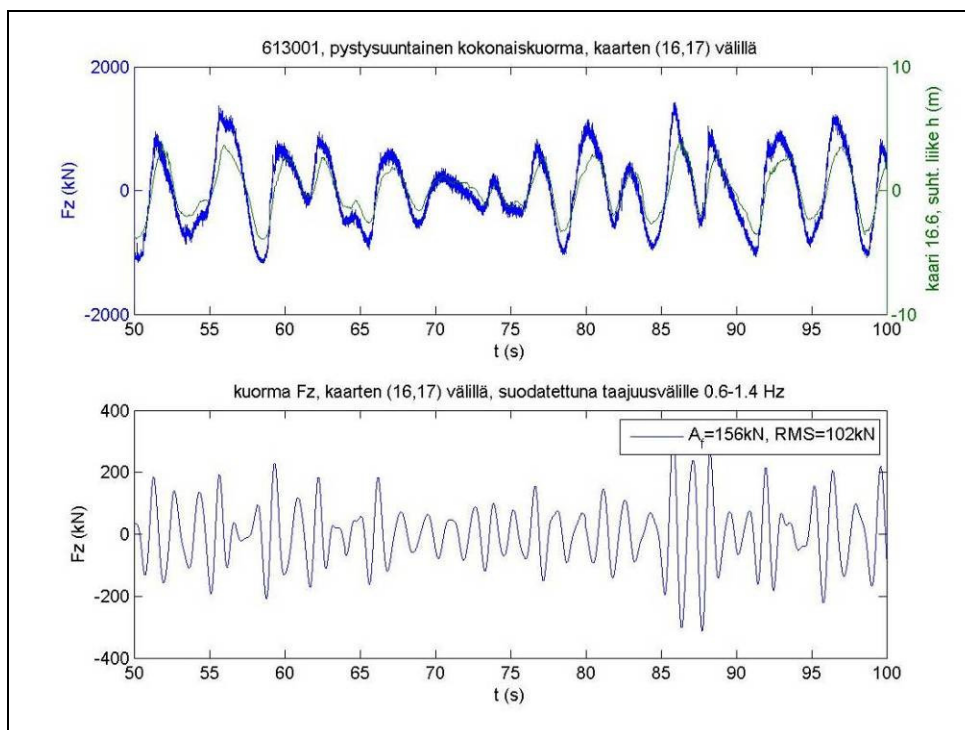


Kuva 54. Tapauksen $H_S=2,0$ m, $\beta=160$ deg, JONSWAP-spektrin mukainen kohtaamisspektri sekä tämän spektrin 2. ja 3. kertaluokka.

Kokonaisvoiman tarkastelu aikatasossa paljastaa minkä muotoisesta kokonaisvoimasta eri kuormituksen kertaluvut ovat peräisin. Otetaan vertailtaviksi kaksi lähes ääripään tapausta. Tapaukset $H_S=1,4$ m, $\beta=180$ deg (pienin aallonkorkeus, suurin kohtaamiskulma) ja $H_S=3,4$ m, $\beta=140$ deg (suurin aallonkorkeus, toiseksi pienin kohtaamiskulma). Vertaillaan näitä kahta tapausta, koska näillä kohtaamistaajuuden piikkitaajuus on hyvin erisuuruinen, mutta silti kokonaisvoiman teholliset amplitudit taajuusvälillä $0,6-1,4$ Hz ovat hyvin samanarvoisia. Suodattamattoman kokonaisvoiman kuvaajat ovat hyvin erinäköisiä näillä kahdella tapauksella (kuvat 55 ja 56). Pienemmän aallonkorkeuden tapauksessa kokonaisvoiman amplitudi on huomattavasti pienempi. Kuvassa 55 suodattamattoman kokonaisvoiman asteikko on ± 1000 kN, kun taas kuvassa 56 suodattamattoman kokonaisvoiman asteikko on ± 2000 kN. Pienemmän aallonkorkeuden tapauksessa kuormitus on ensimmäistä ja toista kertaluokkaa, kun taas suuremman aallonkorkeuden tapauksessa kuormitus on kolmatta ja neljättä kertaluokkaa. Suuremmalla aallonkorkeudella suuremmat kuormitukset nousevat hyvin jyrkästi, jolloin kuormituksella on korkeampienkin taajuuksien komponentteja. Toisaalta kuitenkin kuormitus toistuu harvemmin jolloin sen kontribuutio tarkasteltavalle taajuusvälille jää pienemmäksi. Kun tarkastellaan näiden kahden tapauksen taajuusvälille $0,6-1,4$ Hz päästösodatettua kuormitusta ajan funktiona, huomataan, että ne ovat hyvin samannäköiset. Kuormituksen amplitudi on hyvin samaa luokkaa. Molemmissa kuvissa 55 ja 56 suodatettujen kokonaisvoimien kuvien asteikko on sama ± 400 kN.



Kuva 55. $H_S=1,4$ m, $\beta=180$ deg. Ylempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma sininen kuvaaja, suhteellinen liike kaarella 16.6, vihreä kuvaaja. Alempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma suodatettuna



Kuva 56. $H_S=3,4$ m, $\beta=140$ deg. Ylempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma sininen kuvaaja, suhteellinen liike kaarella 16.6, vihreä kuvaaja. Alempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma suodatettuna.

7.5 Analyysin rajoitukset

Mittaukset on suoritettu vain rajoitetulle alueelle toisella puolella keulaa. Puhtaassa vasta-aallokossa todellinen koko runkoon vaikuttava pystysuuntainen voima on kaksinkertainen yhdelle puolelle laskettuun kokonaisvoimaan nähden ja poikittaissuuntainen todellinen kokonaisvoima häviää. Laivan kohdatessa aallokkoa vähänkin sivuvastaisesti voima vaikuttaa eri vaiheessa eri puolilla laivaa. Tällöin etenkin koko runkoon vaikuttavan poikittaissuuntaisen voiman suuruudesta ei voida näiden mittausten perusteella sanoa mitään. Sivuvastaisessa aallokossa toisella puolella vaikuttavia voimia voidaan arvioida, mutta mitään todellista mittaustietoa niistä ei ole. Lyhyemmillä aalloilla katveen puolella vaikuttavat voimat ovat todennäköisesti hyvin pieniä, koska aallot heijastuvat kyljestä eivätkä kulje keulan läpi. Pienemmät aallot heijastuvat koska aallon aiheuttama painemuutos ei ylety kovin syvälle.

Toinen analyysin rajoituksista liittyy mittaukseen rajoitetulla alueella. Osassa ajoja, jotkin antureista olivat poissa toiminnasta, jolloin näillä ajoilla toimimattomien antureiden signaalia ei ole otettu huomioon. Paine on tällöin interpoloitu toimimattoman anturin alueelle vierekkäisten antureiden signaalin perusteella, jolloin interpoloinnin tarkkuus heikkenee. Antureiden kalibrointiin tai mittausepä tarkkuuteen liittyy oma virheensä. Tämän virheen suuruudesta ei voi esittää minkäänlaista arviota, sillä mittaukset on suorittanut ulkopuolinen mallikoelaitos.

Analysointimenetelmään liittyvän virheen taas voidaan todeta johtuvan kahdesta tekijästä, interpoloinnin virheestä sekä voiman laskennan virheestä. Voiman laskennassa virhe on erittäin pieni, tämä oli todettu vertailemalla nostejakauman laskentaa kohdassa 4.2.2. Sen sijaan paineen interpoloinnista aiheutuu enemmän virhettä. Painepeikit tasoittuvat lineaarisessa interpoloinnissa. Paineen arvot antureiden välillä ovat pienemmät.

Analyysin rajoituksista huolimatta herätevoiman suuruusluokkaa on pystytty arvioimaan sekä paljastamaan tekijöitä, joista kuormat riippuvat kuten kaarikulma sekä kohtaamiskulma.

8 Johtopäätökset

Paine oli mitattu useista pisteistä keulan alueella. Tällaista mittaamistapaa ei oltu aikaisemmin käytetty arvioitaessa aallokon aiheuttamia pieniä värähtelyherätteitä. Menetelmä on erittäin toimiva ja sillä saatiin arvokkaita tuloksia herätteen vaikutuskohdasta ja herätteen luonteesta. Mittauksissa oli käytetty epäsäännöllistä aallokkoa. Tämän etuna on todellisen tilanteen mallintaminen. Ilmiöön vaikuttavien tekijöiden selvittämisen kannalta säännöllinen aallokko olisi saattanut olla parempi. Epäsäännöllisen aallokon tapauksessa aallokon spektri on pyritty pitämään mahdollisimman todellisena, jolloin aallon korkeutta kasvatettaessa on myös kasvatettu aallokon modaaliperiodia. Tällöin on muutettu kahta parametria samanaikaisesti eikä silloin ole mahdollista saada tietoa esimerkiksi pelkän aallon korkeuden vaikutuksesta.

Mittaustuloksia tarkasteltiin taajuusvälillä, jolle suuren risteilijäaluksen ensimmäiset värähtelyn ominaistaajuudet todennäköisemmin osuvat. Tarkasteltavalle taajuusvälille osuvan herätteen arvot kasvoivat aallokon kääntyessä vasta-aallokosta sivuvastaiseen aallokoon. Aallonkorkeuden kasvulla ei ollut yhtä selkeää vaikutusta herätteeseen. Aallonkorkeutta kasvatettaessa on myös kasvatettu aallokon modaaliperiodia, jolloin myös kohtaamistaajuus on pienentynyt. Suurempi aallonkorkeus kasvattaisi herätevoimaa, mutta pienempi kohtaamistaajuus kasvattaa tarkasteltavalle taajuusvälille osuvaa kuormituksen kertaluokkaa. Kuormituksen kertaluokan kasvaminen pienentää herätevoimaa.

Herätevoiman pysty- ja poikittaissuuntaisten komponenttien suhde riippui kaarikulmasta konstruktiovesiviivan läheisyydessä. Kaarikulmalla todettiin myös olevan vaikutusta paineen arvoihin tarkasteltavalla taajuusvälillä. Useimmilla ajoilla nämä arvot olivat suurimmillaan loivimman kaarikulman kohdissa. Olkapään etupuolella kohdassa, jossa taaksepäin mentäessä konstruktiovesiviivan kulma alkaa kääntyä laivan keskiviivan suuntaiseksi.

Mittaustulosten perusteella erityisesti laivan olkapään etupuolella kuormitus koostuu pienistä iskumaisista kuormista. Olkapään etupuolella kuormitus nousee hyvin nopeasti ja laskee sitten hitaammin. Tämä saattaa johtua loivemmasta kaarikulmasta.

Vedenpinnan suhteellinen nopeus kaarella kasvaa kun kaarikulma loivenee. Slamming malleissa kuormia arvioitaessa suhteellisen nopeuden neliö on kertojana. Loivempi kaarikulma pakottaa veden pinnan nousemaan nopeammin kaarella, jolloin aalto murtuu ja syntyy roiske. Roiske on seuraus suuresta paineesta veden pinnan tuntumassa.

Tämän tutkimuksen perusteella näyttäisi, että jyrkempi kaarikulma konstruktiovesiviivan korkeudella pienentäisi kokonaisuudessaan paineesta aiheutuvaa herätevoimaa. Vaikka poikittaissuuntainen herätevoima kasvaa suhteessa pystysuuntaiseen herätevoimaan saattaisi tämä olla pienten aaltokuormien suhteen edullisempi muoto.

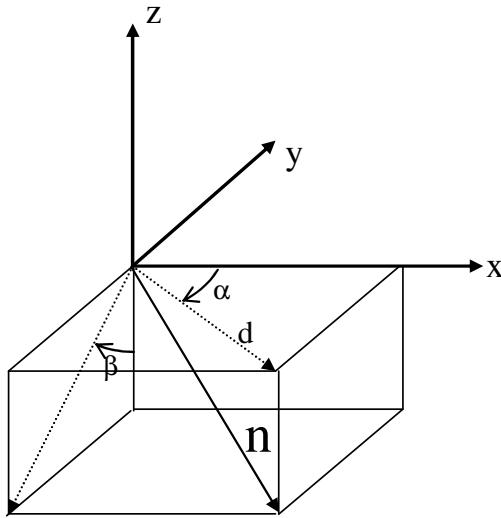
Kaarikulmien ja vesiviivaan kulmien variointi suorittamalla mittauksia eri runkomuodoille voisi tuoda vahvistuksen kaarikulman ja vesiviivan kulman vaikutuksista herätevoimaan. Säännöllisen aallokon mittaukset mahdollistaisivat jatkuvasti samanlaisena toistuvan kuormituksen tutkimisen ja siten näiden avulla mahdollisesti pystyttäisiin muodostamaan tarkempi yhteys suhteellisen liikkeen ja paineen välille.

Lähdeluettelo

1. Hänninen, Satu. 2006. Ship-Wave Interaction as an Excitation of Hull Vibration – Literary Research. Helsinki University of Technology, Ship Laboratory. Espoo.
2. Troesch A. W. 1984. Wave-Induced Hull Vibrations: An Experimental and Theoretical Study. Ann Arbor (MI) : University of Michigan.
3. Tenovuo, Karno. 2005. Värähtelyherätteen analysointi vasteen perusteella isossa risteilylaivassa. Automaatio ja systeemitekniikan osasto. Systeemianalyysin laboratorio. Diplomityö 110 s. Espoo.
4. Bishop R. E. D. and Price W. G. 1979. Hydroelasticity of Ships. Cambridge University Press, Cambridge.
5. Pennala E. 1998. Lujuusopin perusteet. Otatieto Oy, Helsinki.
6. Hänninen, Satu ja Matusiak, Jerzy and Niemelä, Ari. Effect of Ship Main Dimensions on Springing Type Vibration. Paper being repared. Espoo.
7. Inman. Daniel J. 2001. Engineering Vibration. Prentice-Hall, New Jersey.
8. Kinsman, Blair. 1965. Wind Waves their Generation and Propagation on the Ocean Surface. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.
9. Le Méhauté, B. 1976. An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves. Springer – Verlag, New York Heidelberg Berlin.
10. Lloyd, A. R. J. M. 1989. Seakeeping: Ship Behaviour in Rough Weather. Ellis Horwood Series in Marine Technology, John Wiley & Sons.

11. Matusiak, Jerzy. 2002. Laivan ohjailu ja merikelpoisuus. Teknillinen korkeakoulu. Otaniemi, Espoo.
12. ITTC – Recommended Procedures 7.5-02-07-02.1. Testing and Extrapolation Methods, Loads and Responses, Sea Keeping, Sea Keeping Experiments. 2002. [Viitattu 31.1.2007]. Saatavissa: http://itct.sname.org/2002_recomm_proc/7.5-02-07-02.1.pdf.
13. Prevosto, Marc. 2006. Support de cours: “Océano-météorologie, Les vagues”, Ecole Centrale de Nantes. IFREMER - Département Essais et Recherches Technologiques Service Hydrodynamique et Océano-Météo, Nantes.
14. Ferrant, Pierre. 2006. Kurssin ”Tenue à la Mer” luentomateriaali. Ecole Centrale de Nantes, Nantes.
15. Marin, Maritime Research Institute Netherlands, Internetsivut – Basins – Seakeeping and Manoeuvring Basin, 2007. [viitattu 18.4.2007]. Saatavissa: <http://www.marin.nl/web/show/id=45351>.
16. Cook, Robert. D et al. 2002. Concepts and Applications of Finite Element Analysis, 4th edition. John Wiley & Sons, New York.
17. Eirola, Timo. 2002. Osittaisdifferentiaaliyhtälöt. Kurssin “Matematiikan perusteet L4” luentomateriaali, kevät 2002. Teknillinen Korkeakoulu. Otaniemi, Espoo.
18. Chapra, S. C. et al. 1988. Numerical Methods for Engineers. McGraw-Hill, New York.
19. Oppenheim, Alan V. 1989. Discrete-Time Signal Processing. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Liite A Pinnan normaalivektorit



Kuva A.1. Pinnan normaalivektoreiden kulmien määrittäminen.

Pinnan normaalin suunnasta on annettu kulmat α ja β . Pinnan normaalin x, y ja z komponentit voidaan laskea seuraavasti. Merkitään d :llä vektorin, joka on xy -tasossa pituutta, silloin normaalin komponentit d :n avulla lausuttuina ovat:

$$\begin{aligned} n_x &= d \cos(\alpha) \\ n_y &= -d \sin(\alpha) \\ n_z &= n_y / \tan(\beta) = -d \frac{\sin(\alpha)}{\tan(\beta)} = -d \frac{\sin(\alpha) \cos(\beta)}{\sin(\beta)} \end{aligned} \quad (A-1 \text{ a-c})$$

lisäksi normaalivektorin pituuden on oltava 1, jolloin:

$$\begin{aligned} 1 &= d^2 + n_z^2 \\ d &= \sqrt{1 - n_z^2} \end{aligned} \quad (A-2)$$

Sijoitetaan d n_z :n yhtälöön (A-1 c) ja sievennetään siten, että saadaan n_z ainoastaan yhtälön vasemmalle puolelle:

$$\begin{aligned}
n_z &= -\sqrt{1-n_z^2} \frac{\sin(\alpha) \cos(\beta)}{\sin(\beta)} \\
n_z^2 &= (1-n_z^2) \frac{\sin^2(\alpha) \cos^2(\beta)}{\sin^2(\beta)} \\
n_z^2 &= \frac{\sin^2(\alpha) \cos^2(\beta)}{\sin^2(\beta)} - n_z^2 \frac{\sin^2(\alpha) \cos^2(\beta)}{\sin^2(\beta)} \\
n_z^2 \left(1 + \frac{\sin^2(\alpha) \cos^2(\beta)}{\sin^2(\beta)} \right) &= \frac{\sin^2(\alpha) \cos^2(\beta)}{\sin^2(\beta)} \\
n_z^2 \left(\frac{\sin^2(\beta) + \sin^2(\alpha) \cos^2(\beta)}{\sin^2(\beta)} \right) &= \frac{\sin^2(\alpha) \cos^2(\beta)}{\sin^2(\beta)} \\
n_z^2 &= \frac{\sin^2(\alpha) \cos^2(\beta)}{\sin^2(\beta) + \sin^2(\alpha) \cos^2(\beta)} .
\end{aligned} \tag{A-3}$$

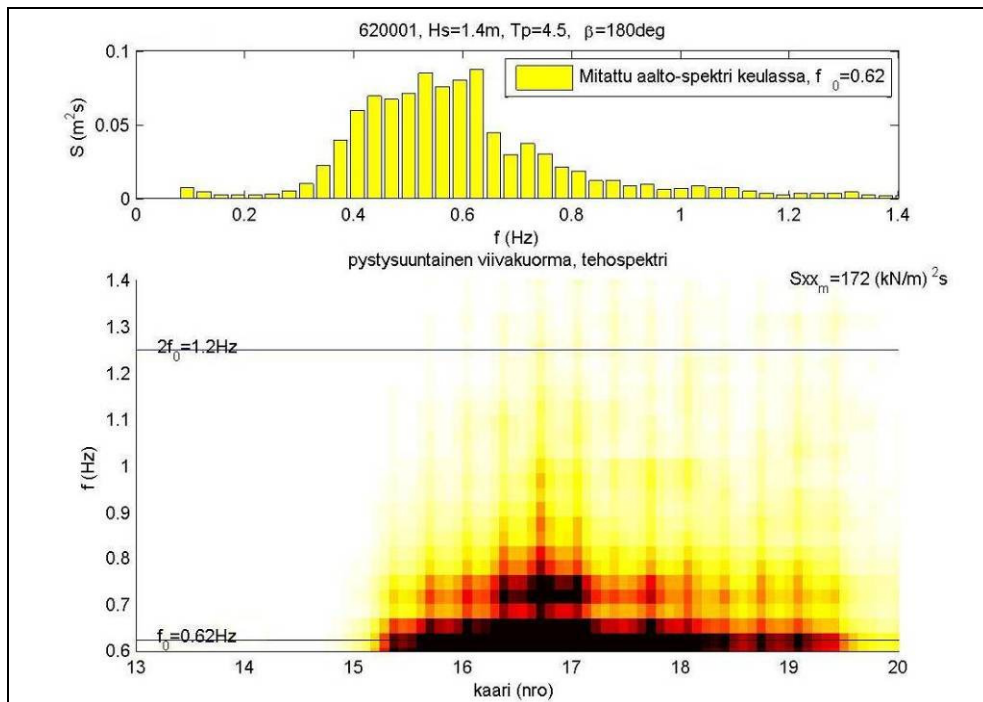
Nyt d :n arvo saadaan laskettua yhtälöstä (A-2) sijoittamalla tähän yhtälön yhtälön (A-3) viimeinen muoto ja sieventämällä:

$$\begin{aligned}
d &= \sqrt{1-n_z^2} \\
d^2 &= 1 - \frac{\sin^2(\alpha) \cos^2(\beta)}{\sin^2(\beta) + \sin^2(\alpha) \cos^2(\beta)} \\
d^2 &= \frac{\sin^2(\beta) + \sin^2(\alpha) \cos^2(\beta) - \sin^2(\alpha) \cos^2(\beta)}{\sin^2(\beta) + \sin^2(\alpha) \cos^2(\beta)} \\
d^2 &= \frac{\sin^2(\beta)}{\sin^2(\beta) + \sin^2(\alpha) \cos^2(\beta)} \\
d &= \frac{\sin(\beta)}{\sqrt{\sin^2(\beta) + \sin^2(\alpha) \cos^2(\beta)}} .
\end{aligned} \tag{A-4}$$

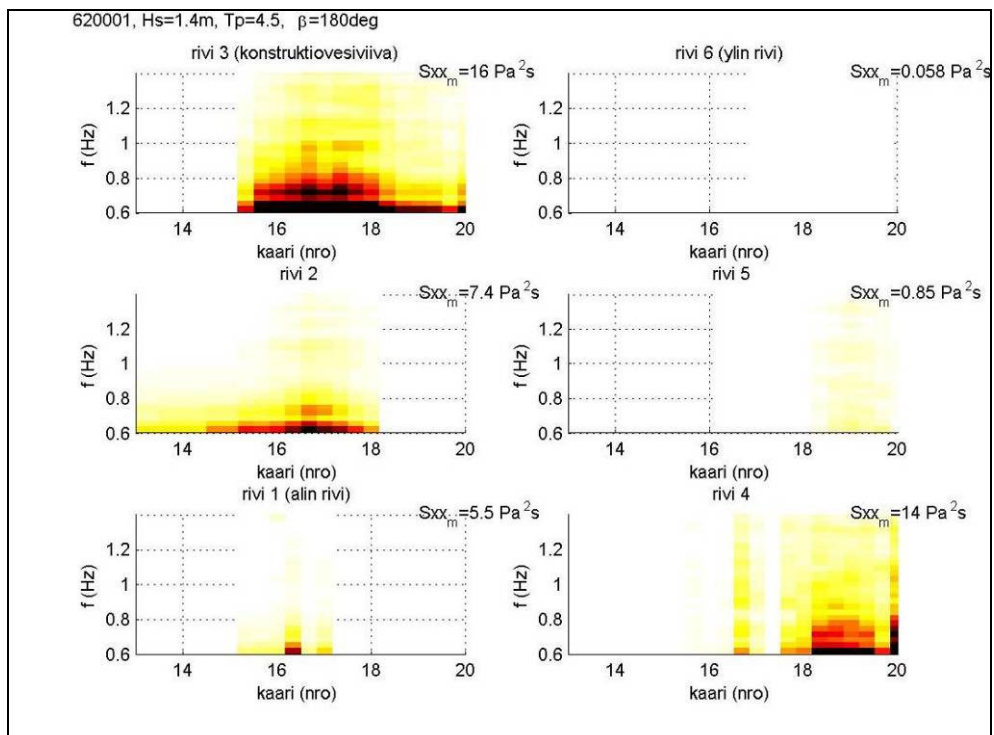
Sijoitetaan laskettu d ensimmäisiin yhtälöihin (A-1 a-c), jolloin saadaan lopulta normaalivektorin \mathbf{n} komponentit kulmien α ja β funktioina.

$$\begin{aligned}
n_x &= \cos(\alpha) \sin(\beta) \frac{1}{\sqrt{\sin^2(\beta) + \sin^2(\alpha) \cos^2(\beta)}} \\
n_y &= -\sin(\alpha) \sin(\beta) \frac{1}{\sqrt{\sin^2(\beta) + \sin^2(\alpha) \cos^2(\beta)}} \\
n_z &= -\sin(\alpha) \cos(\beta) \frac{1}{\sqrt{\sin^2(\beta) + \sin^2(\alpha) \cos^2(\beta)}} .
\end{aligned} \tag{A-5 a-c}$$

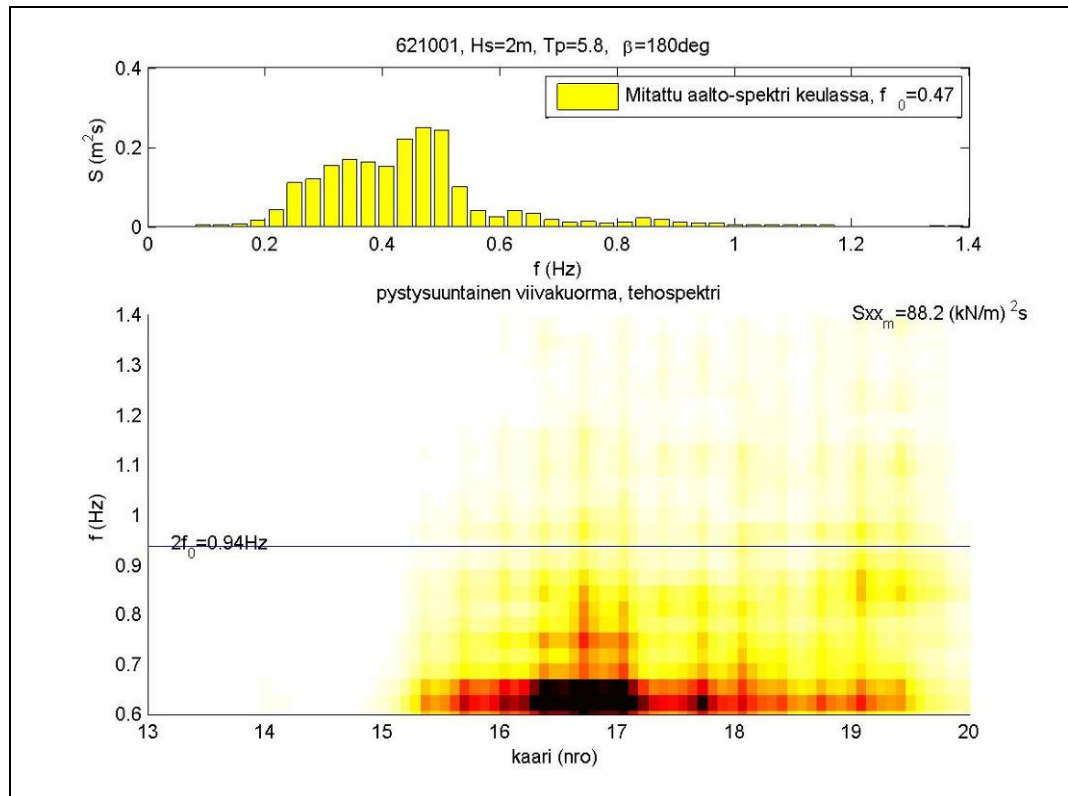
Liite B Taajuussisältö



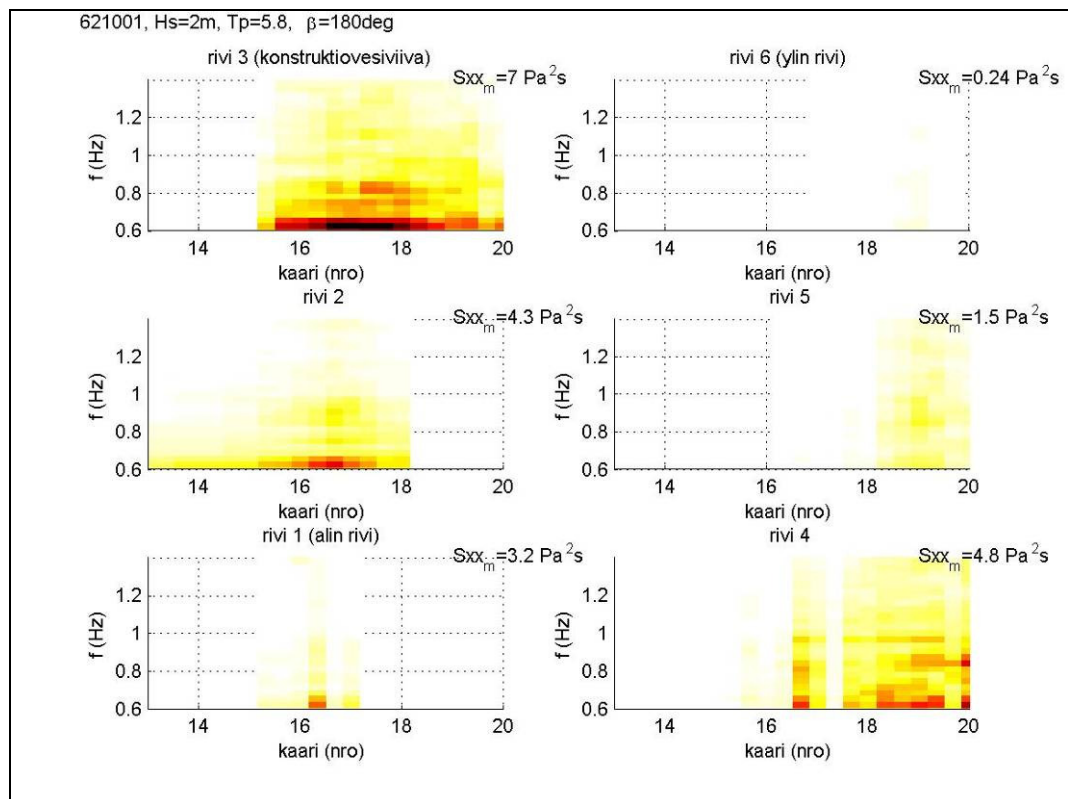
Kuva B.1. $H_s=1.4\text{ m}$, $\beta=180\text{ deg}$. Kohdattu aaltospektri (ylempi kuva). Pystysuuntaisen viivakuorman taajuussisältö (alempi kuva).



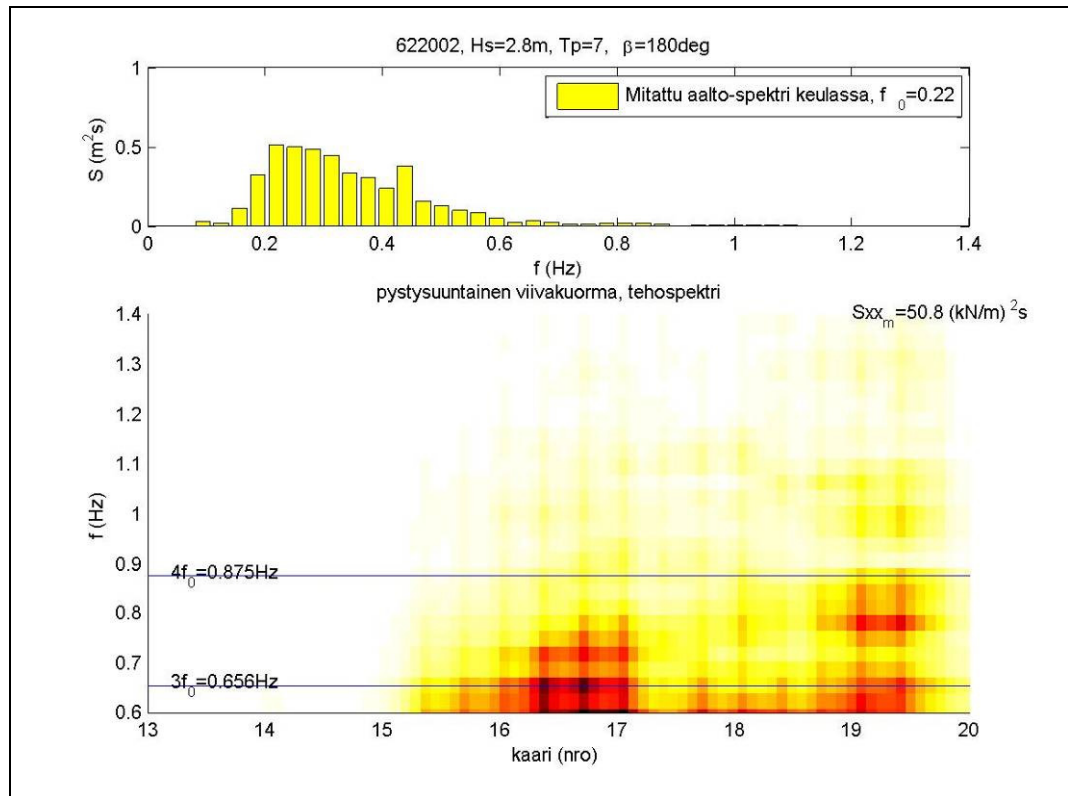
Kuva B.2. $H_s=1.4\text{ m}$, $\beta=180\text{ deg}$. Paineantureiden taajuussisältö riveittäin.



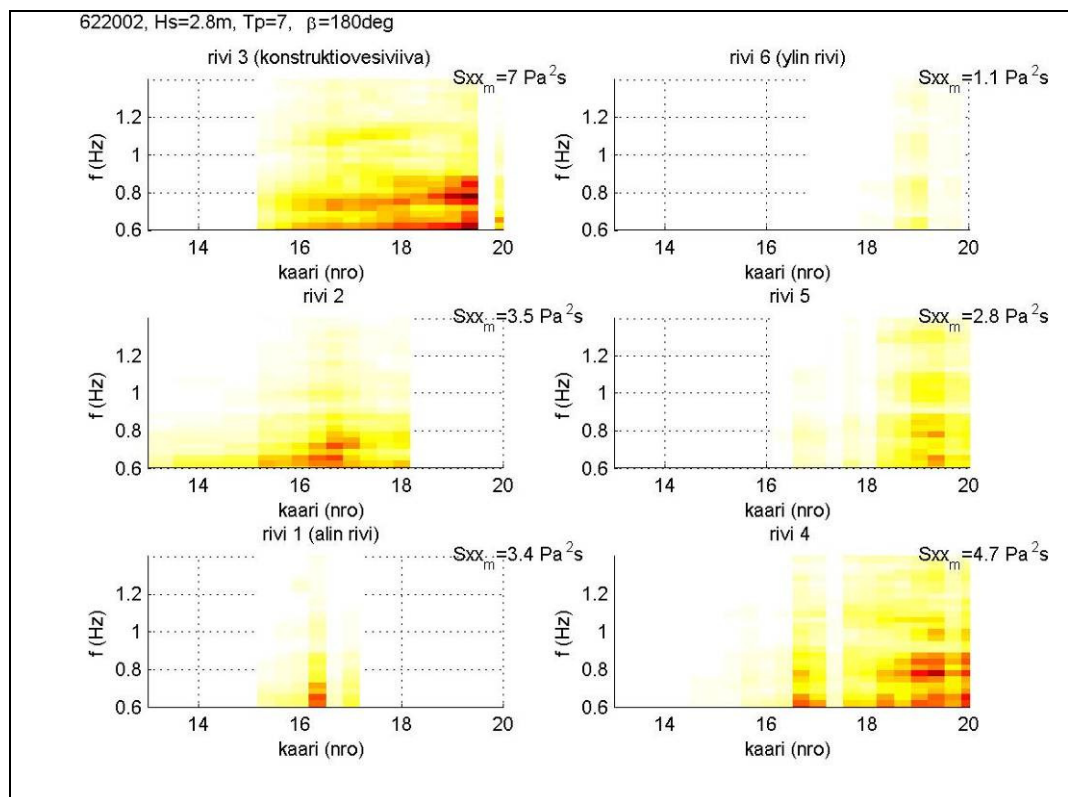
Kuva B.3. $H_s=2.0 \text{ m}$, $\beta=180 \text{ deg}$. Kohdattu aaltospektri (ylempi kuva). Pystysuuntaisen viivakuorman taajuussisältö (alempi kuva).



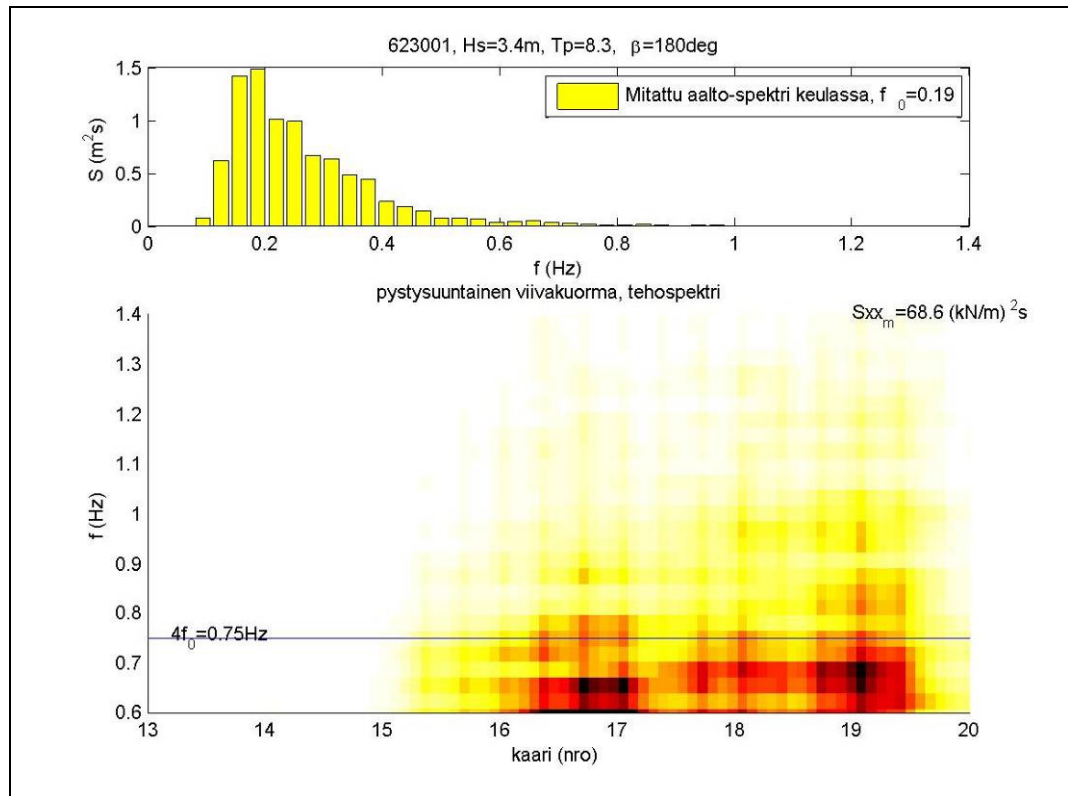
Kuva B.4. $H_s=2.0 \text{ m}$, $\beta=180 \text{ deg}$. Paineantureiden taajuussisältö riveittäin



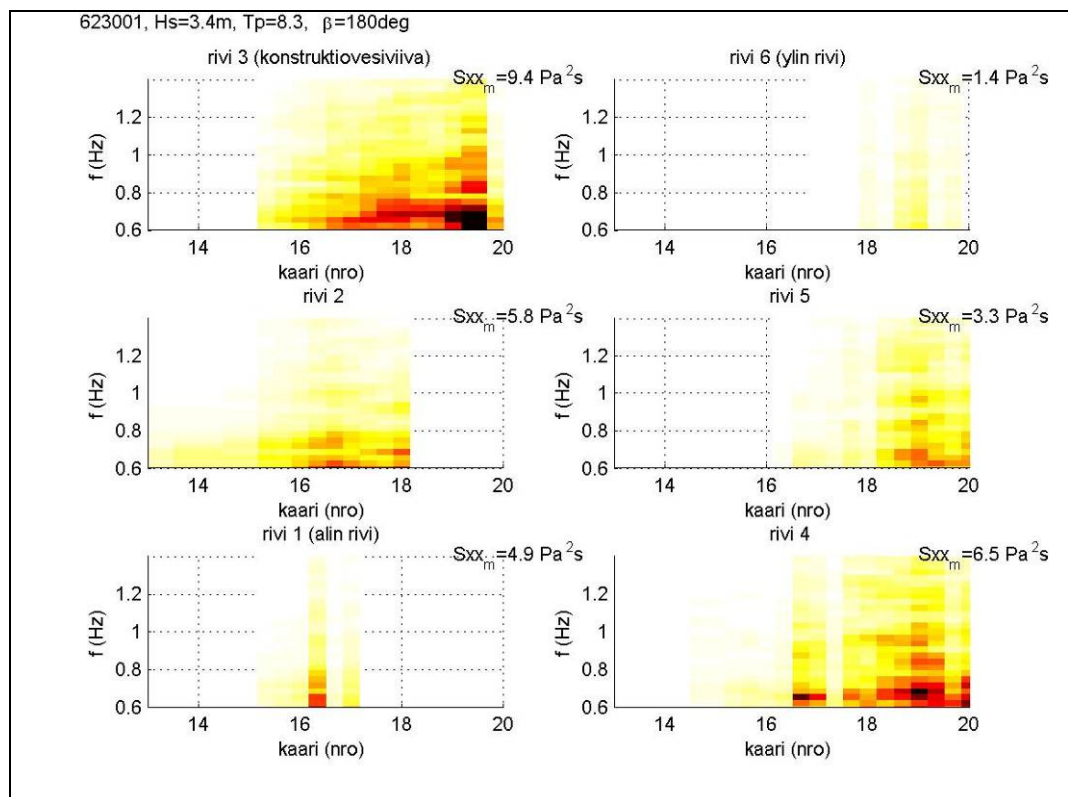
Kuva B.5. $H_s=2.8 \text{ m}$, $\beta=180 \text{ deg}$. Kohdattu aaltospektri (ylempi kuva). Pystysuuntaisen viivakuorman taajuussisältö (alempi kuva).



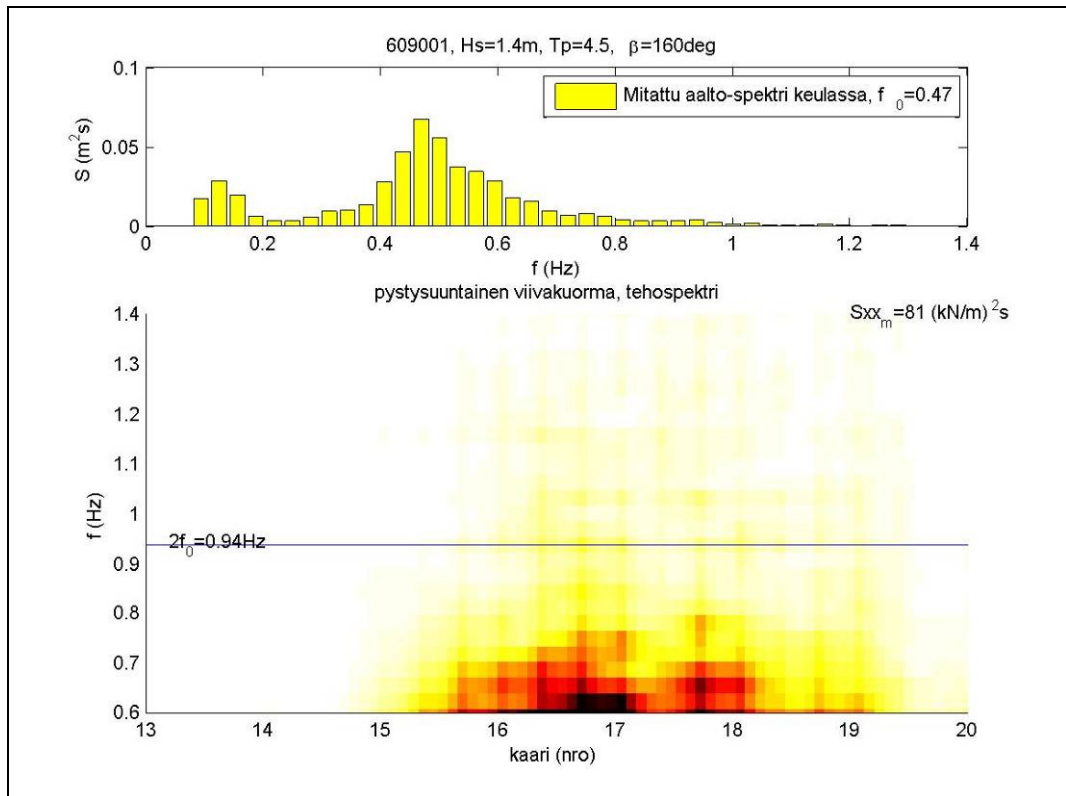
Kuva B.6. $H_s=2.8 \text{ m}$, $\beta=180 \text{ deg}$. Paineantureiden taajuussisältö riveittäin



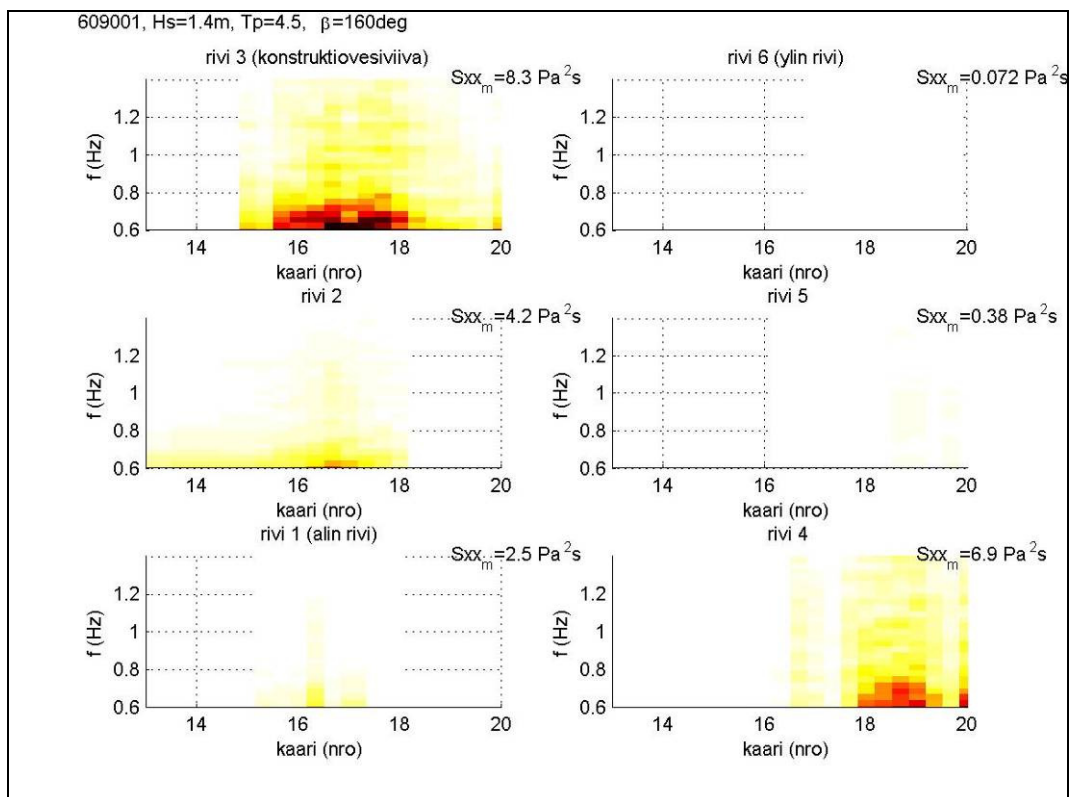
Kuva B.7. $H_s=3.4 \text{ m}$, $\beta=180 \text{ deg}$. Kohdattu aaltospektri (ylempi kuva). Pystysuuntaisen viivakuorman taajuussisältö (alempi kuva).



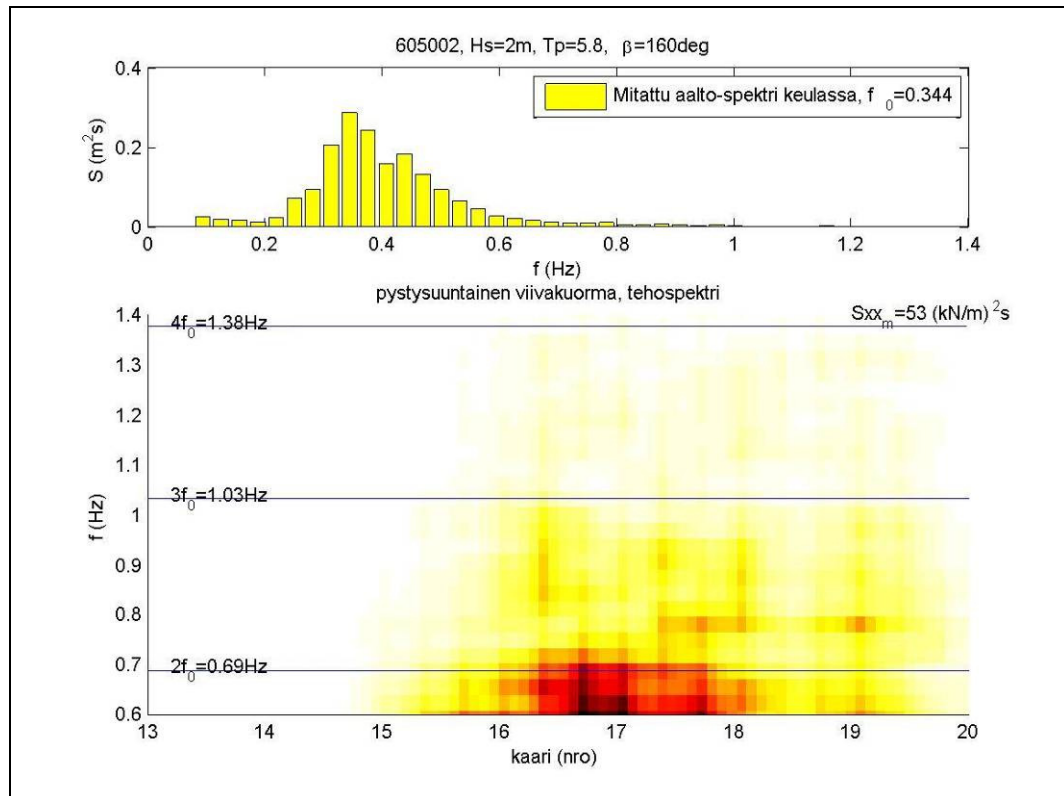
Kuva B.8. $H_s=3.4 \text{ m}$, $\beta=180 \text{ deg}$. Paineantureiden taajuussisältö riveittäin



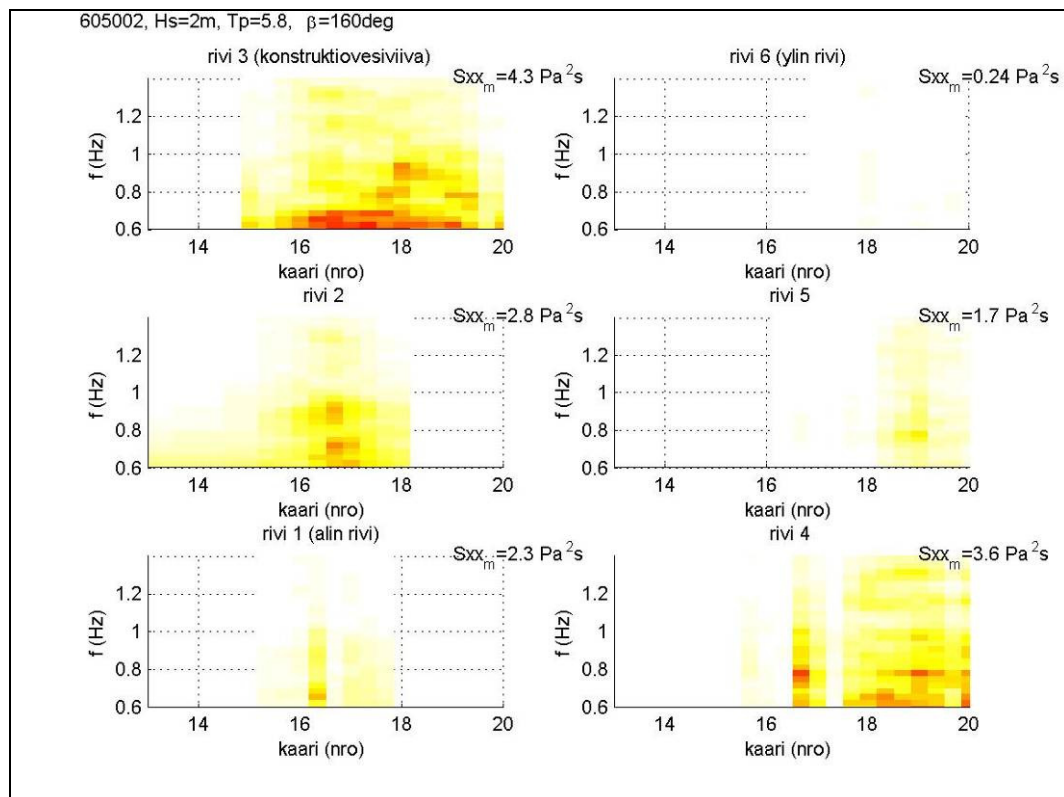
Kuva B.9. $H_s=1.4\text{ m}$, $\beta=160\text{ deg}$. Kohdattu aaltospektri (ylempi kuva). Pystysuuntaisen viivakuorman taajuussisältö (alempi kuva).



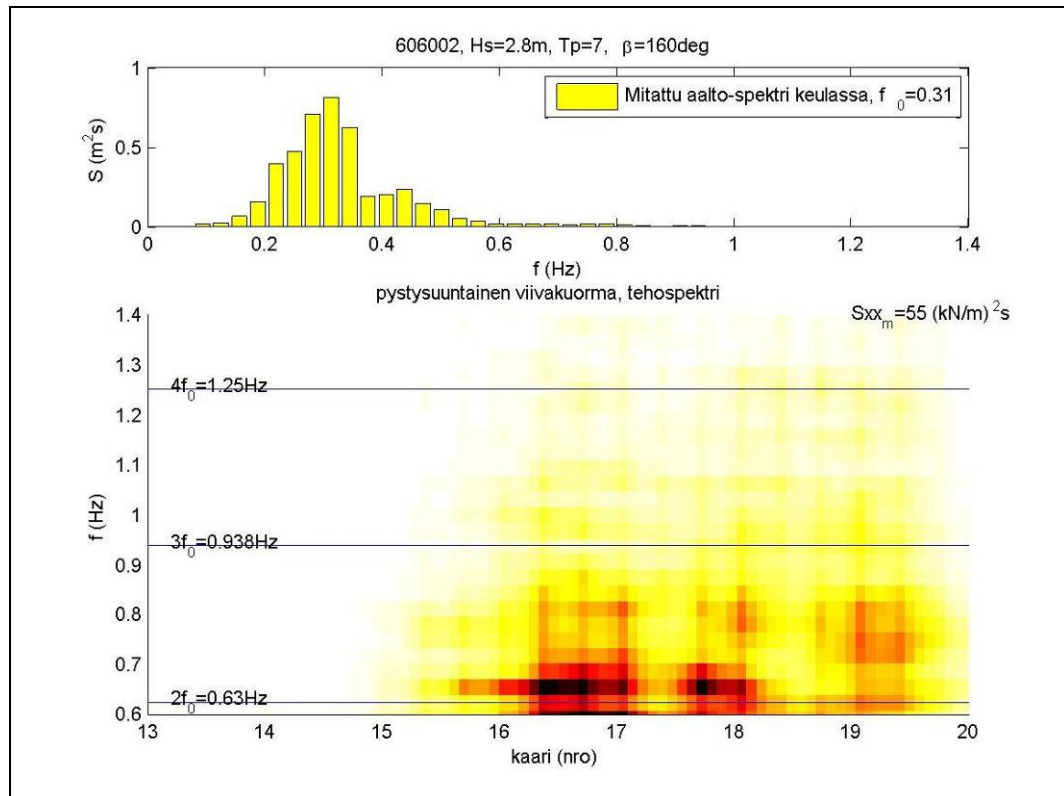
Kuva B.10. $H_s=1.4\text{ m}$, $\beta=160\text{ deg}$. Paineantureiden taajuussisältö riveittäin



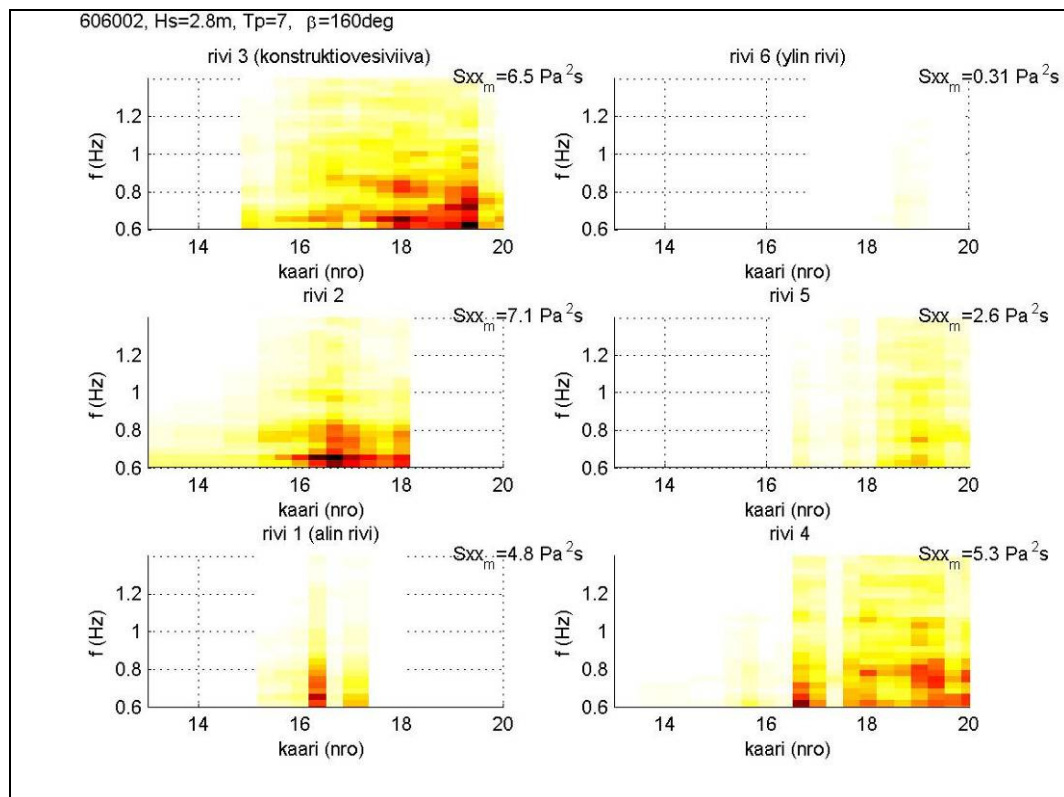
Kuva B.11. $H_s=2.0 \text{ m}$, $\beta=160 \text{ deg}$. Kohdattu aaltospektri (ylempi kuva). Pystysuuntaisen viivakuorman taajuussisältö (alempi kuva).



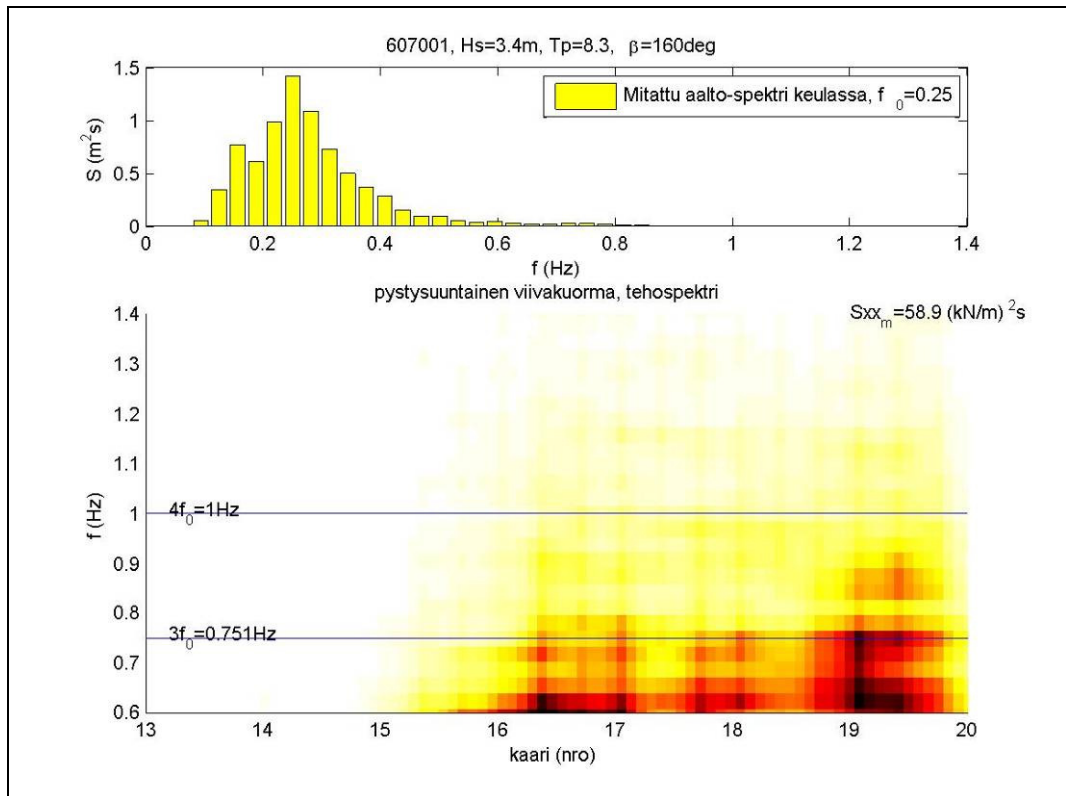
Kuva B.12. $H_s=2.0 \text{ m}$, $\beta=160 \text{ deg}$. Paineantureiden taajuussisältö riveittäin



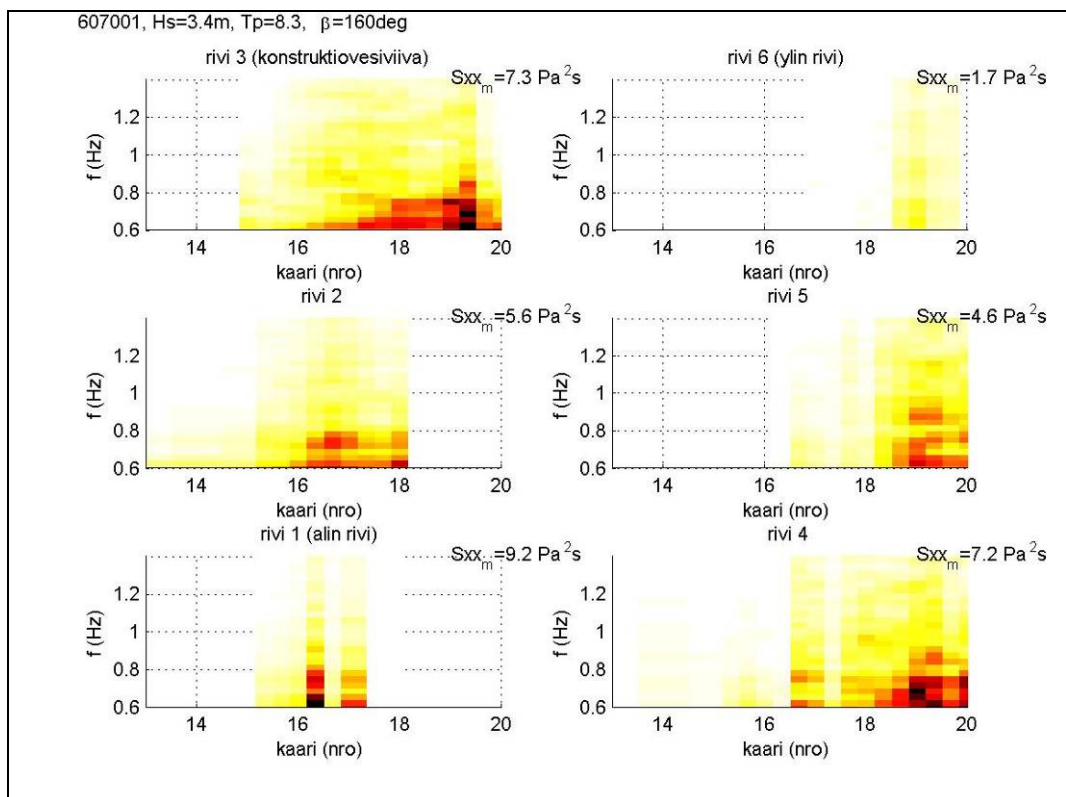
Kuva B.13. $H_s=2.8 \text{ m}$, $\beta=160 \text{ deg}$. Kohdattu aaltospektri (ylempi kuva). Pystysuuntaisen viivakuorman taajuussisältö (alempi kuva).



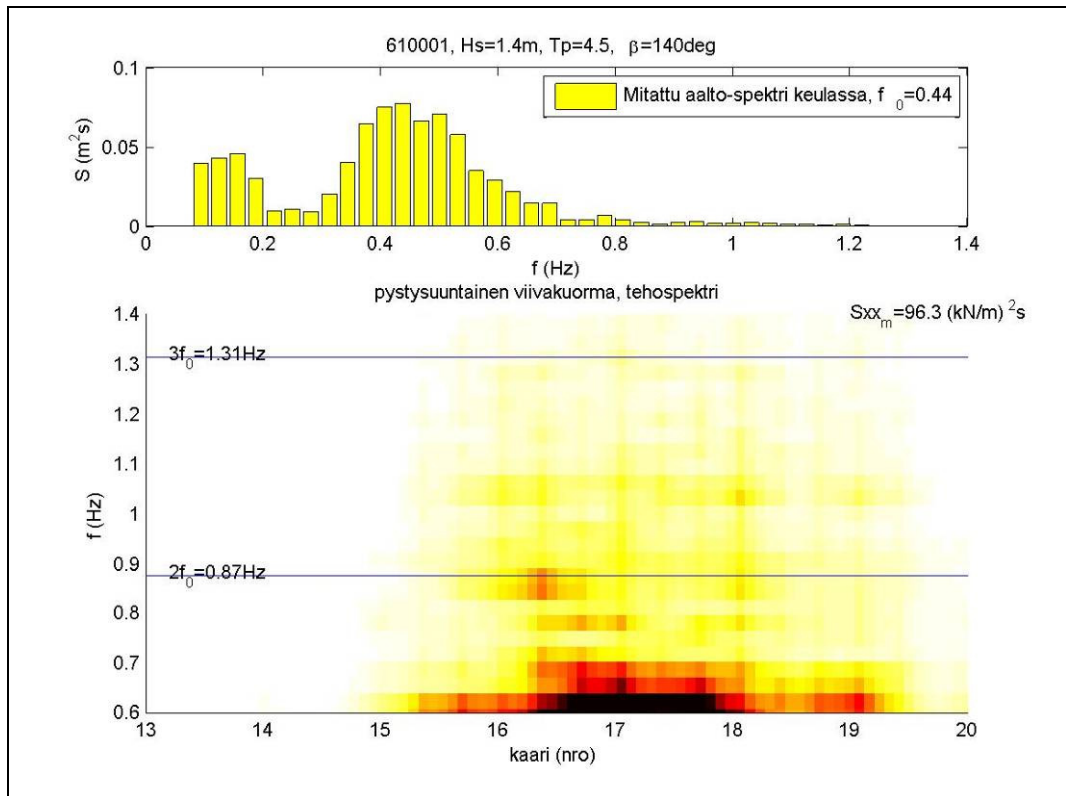
Kuva B.14. $H_s=2.8 \text{ m}$, $\beta=160 \text{ deg}$. Paineantureiden taajuussisältö riveittäin



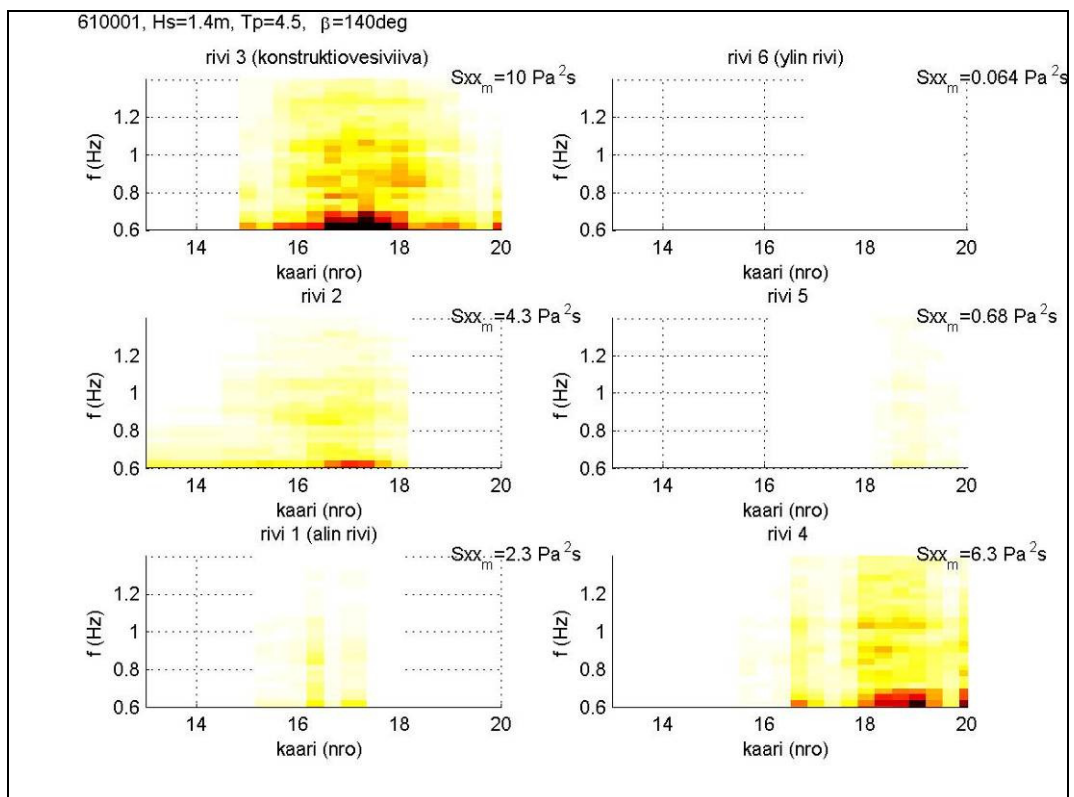
Kuva B.15. $H_s=3.4 \text{ m}$, $\beta=160 \text{ deg}$. Kohdattu aaltospektri (ylempi kuva). Pystysuuntaisen viivakuorman taajuussisältö (alempi kuva).



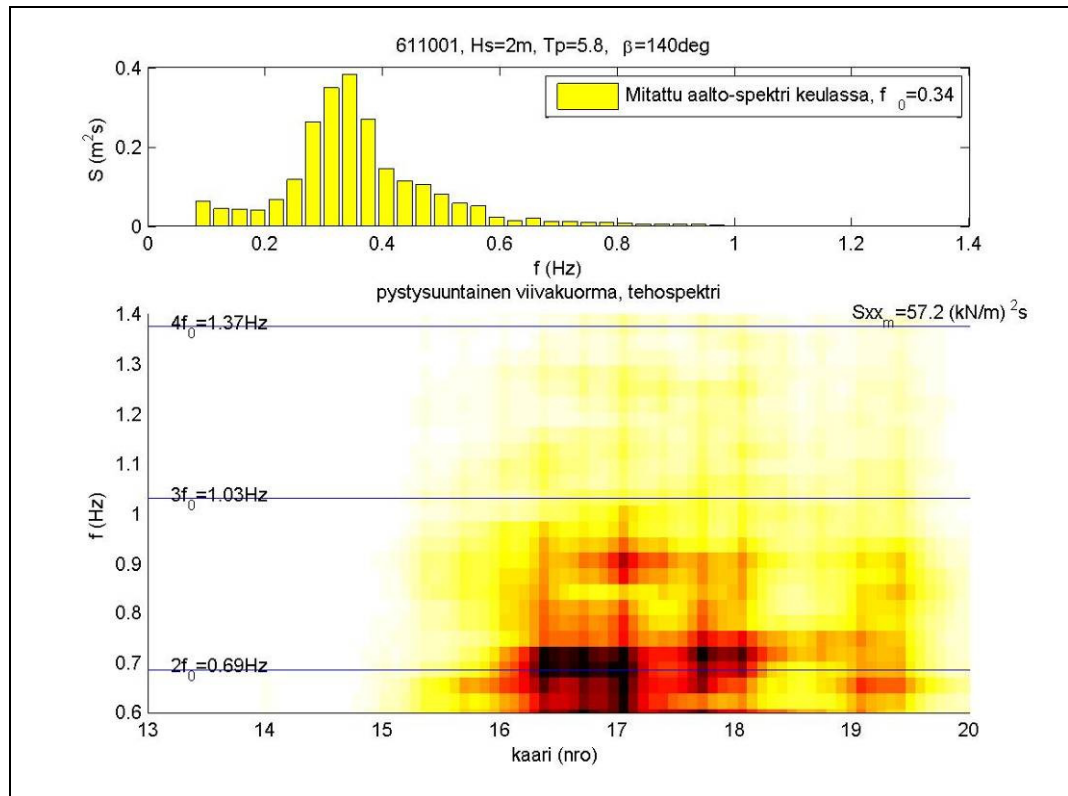
Kuva B.16. $H_s=3.4 \text{ m}$, $\beta=160 \text{ deg}$. Paineantureiden taajuussisältö riveittäin



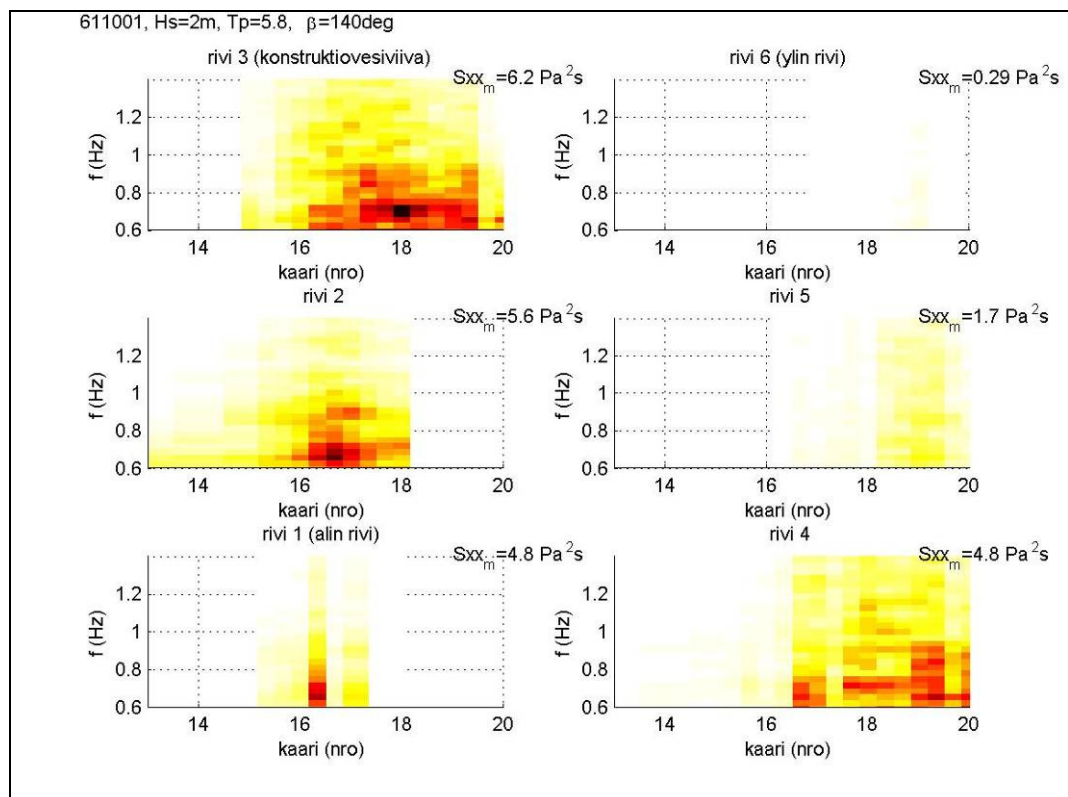
Kuva B.17. $H_s=1.4\text{ m}$, $\beta=140\text{ deg}$. Kohdattu aaltospektri (ylempi kuva). Pystysuuntaisen viivakuorman taajuussisältö (alempi kuva).



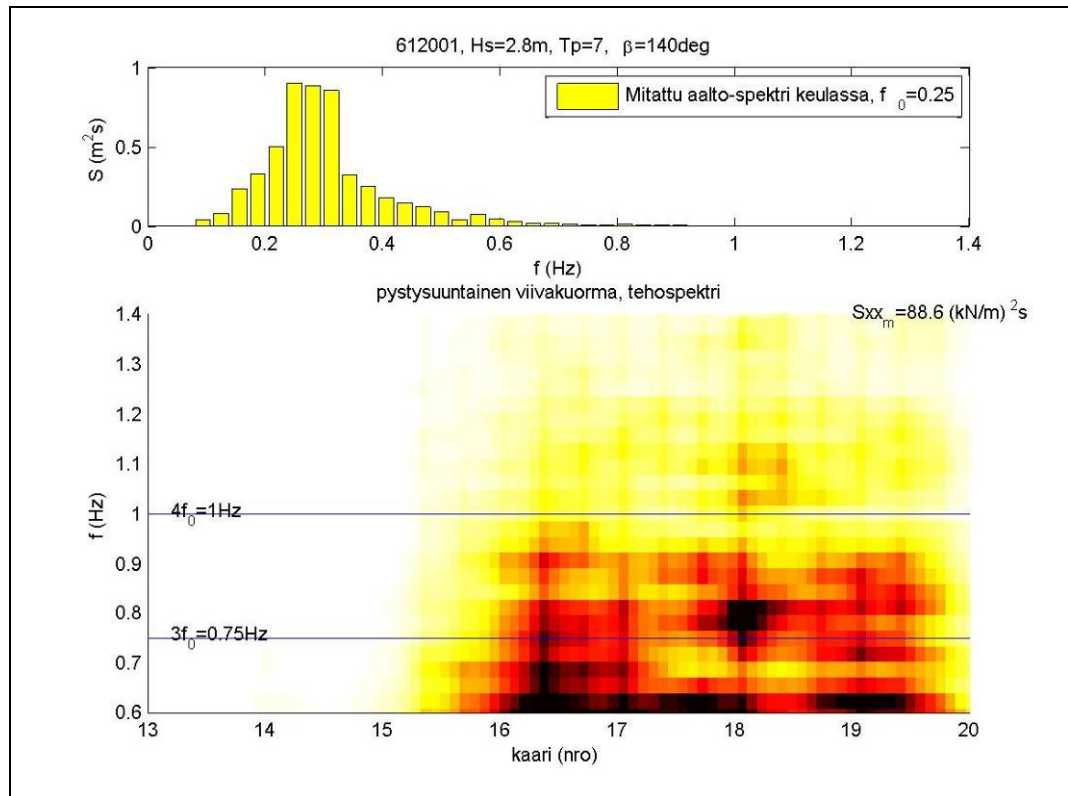
Kuva B.18. $H_s=1.4\text{ m}$, $\beta=140\text{ deg}$. Paineantureiden taajuussisältö riveittäin



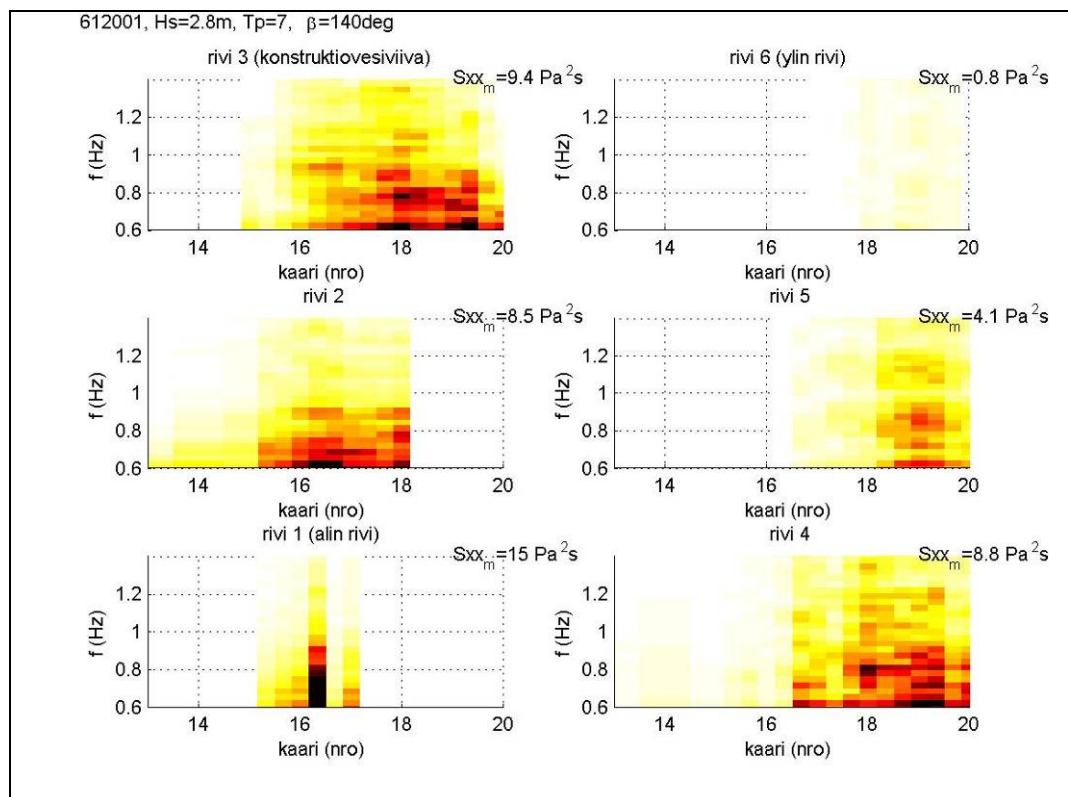
Kuva B.19. $H_s=2.0 \text{ m}$, $\beta=140 \text{ deg}$. Kohdattu aaltospektri (ylempi kuva). Pystysuuntaisen viivakuorman taajuussisältö (alempi kuva).



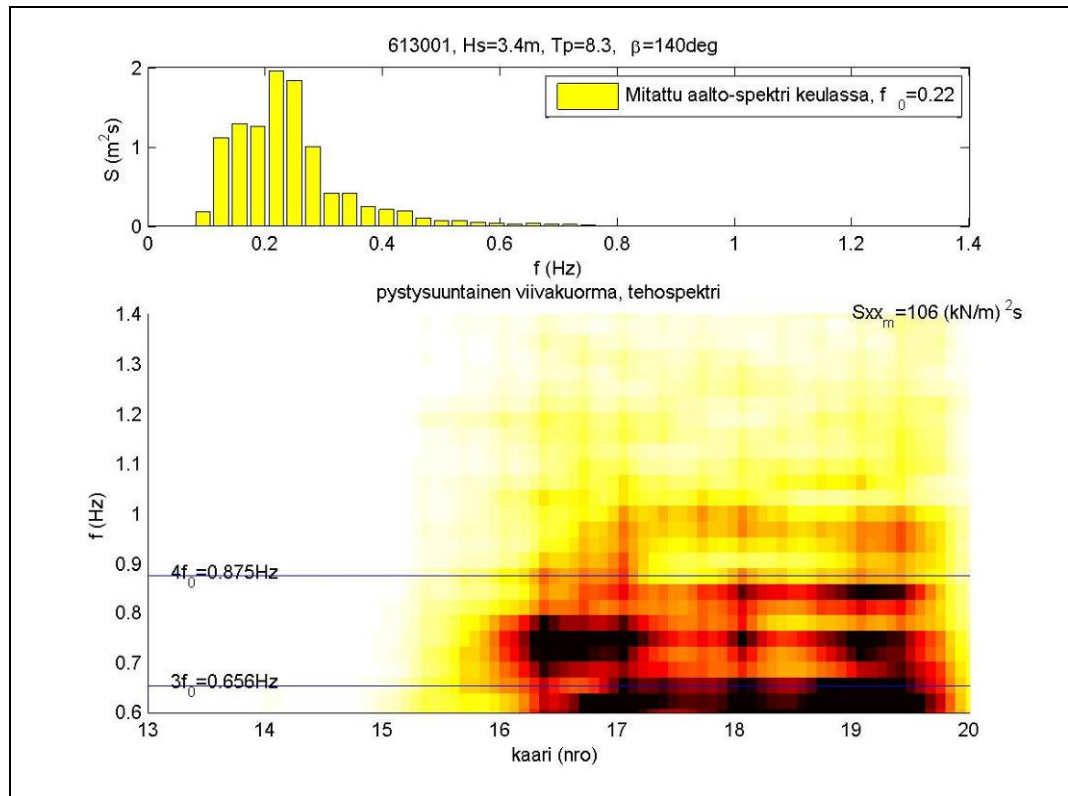
Kuva B.20. $H_s=2.0 \text{ m}$, $\beta=140 \text{ deg}$. Paineantureiden taajuussisältö riveittäin



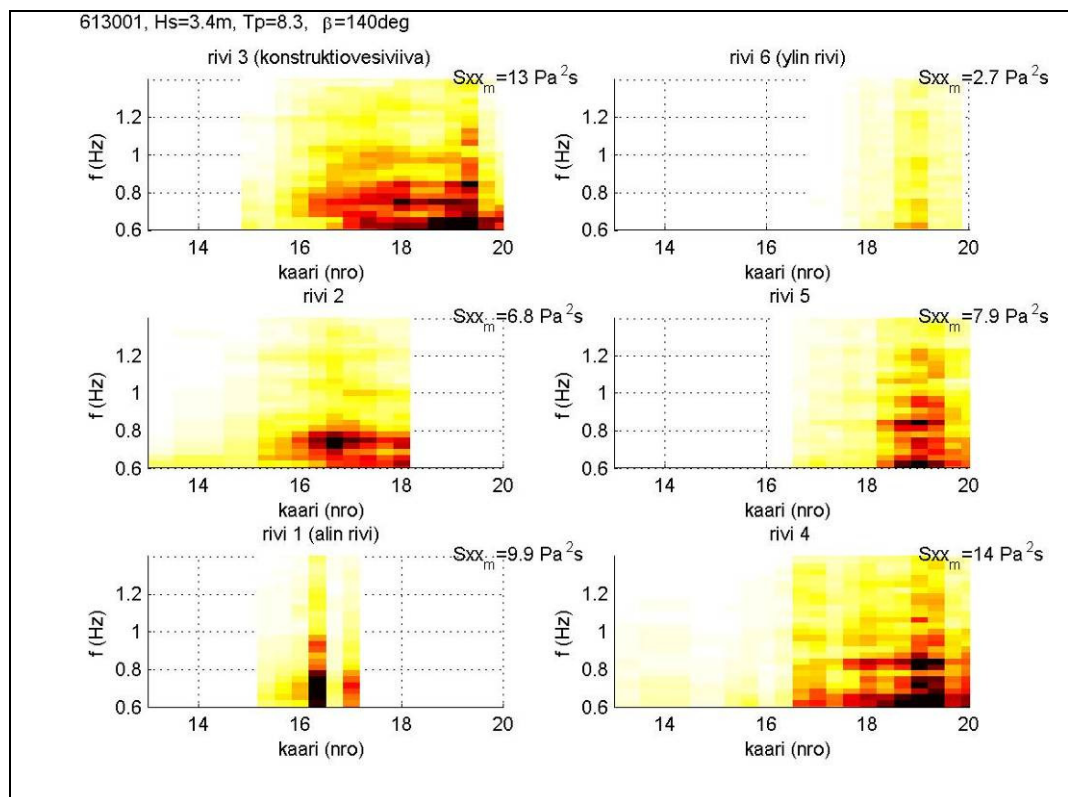
Kuva B.21. $H_s=2.8 \text{ m}$, $\beta=140 \text{ deg}$. Kohdattu aaltospektri (ylempi kuva). Pystysuuntaisen viivakuorman taajuussisältö (alempi kuva).



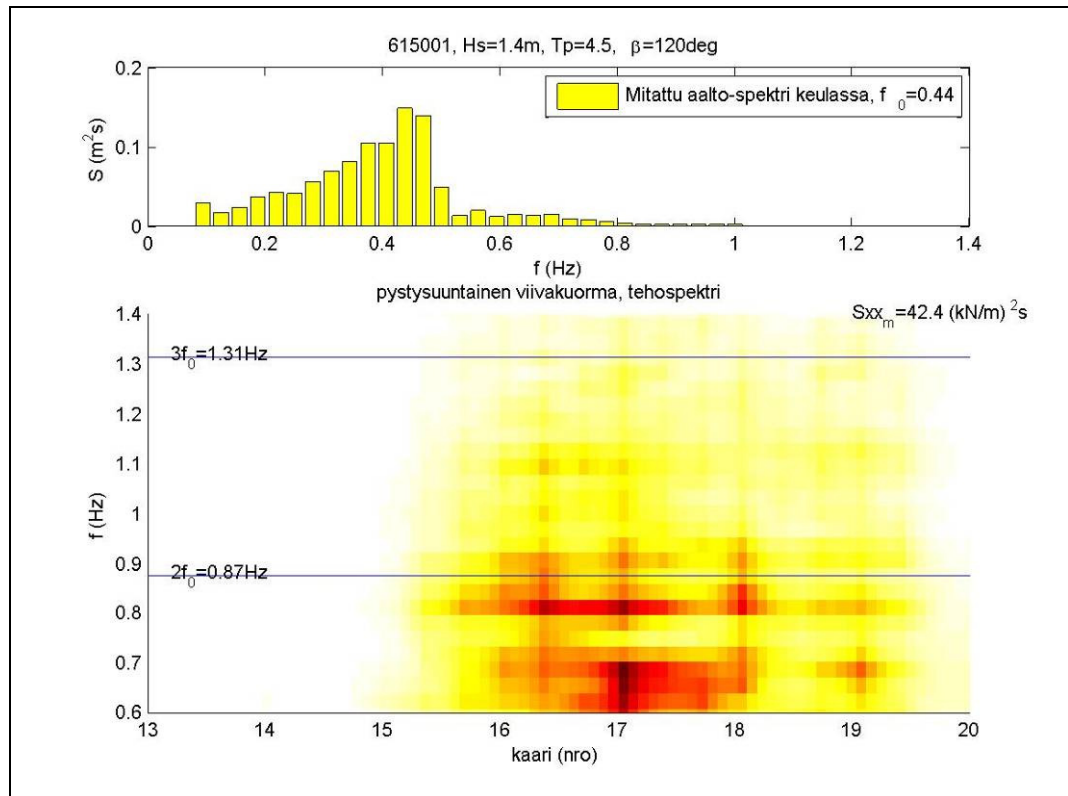
Kuva B.22. $H_s=2.8 \text{ m}$, $\beta=140 \text{ deg}$. Paineantureiden taajuussisältö riveittäin



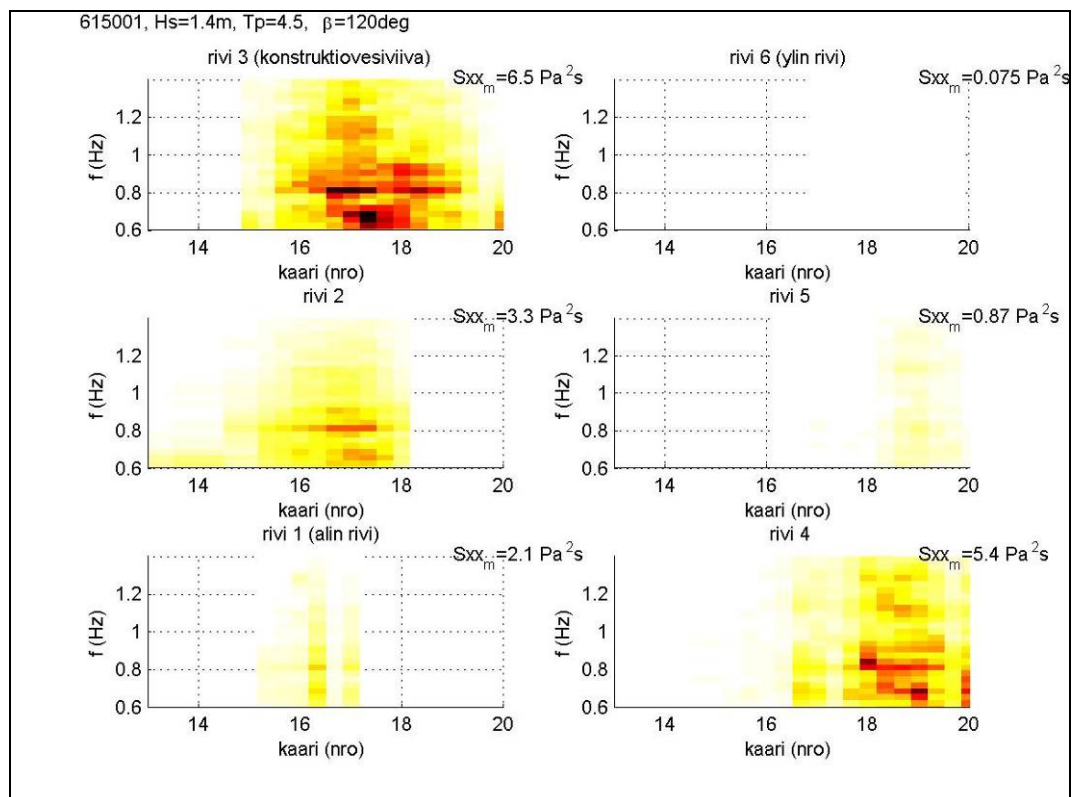
Kuva B.23. $H_s=3.4\text{ m}$, $\beta=140\text{ deg}$. Kohdattu aaltospektri (ylempi kuva). Pystysuuntaisen viivakuorman taajuussisältö (alempi kuva).



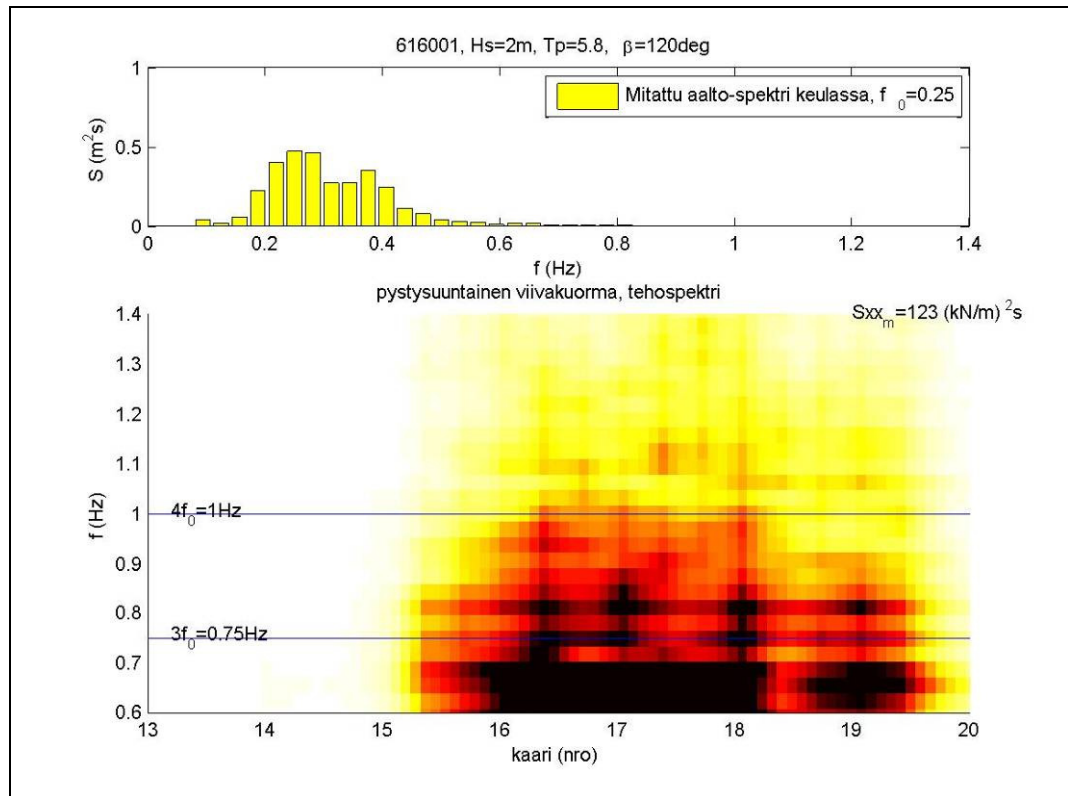
Kuva B.24. $H_s=3.4\text{ m}$, $\beta=140\text{ deg}$. Paineantureiden taajuussisältö riveittäin



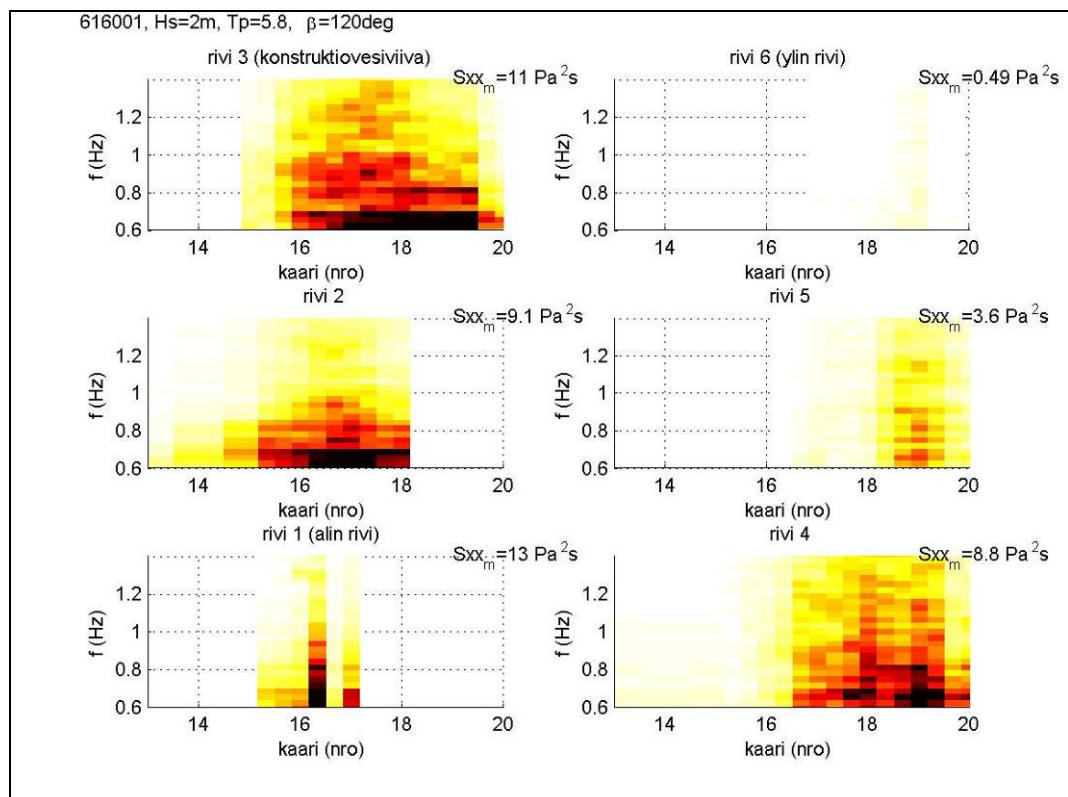
Kuva B.25. $H_s=1.4 \text{ m}$, $\beta=120 \text{ deg}$. Kohdattu aaltospektri (ylempi kuva). Pystysuuntaisen viivakuorman taajuussisältö (alempi kuva).



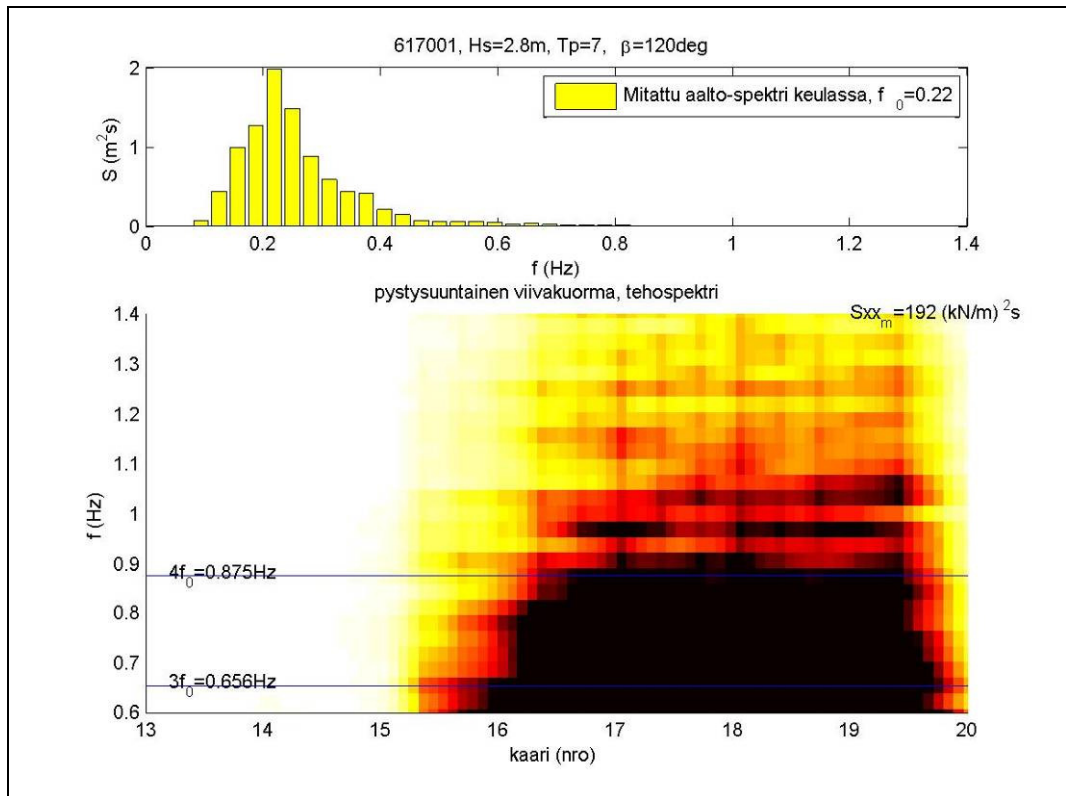
Kuva B.26. $H_s=1.4 \text{ m}$, $\beta=120 \text{ deg}$. Paineantureiden taajuussisältö riveittäin



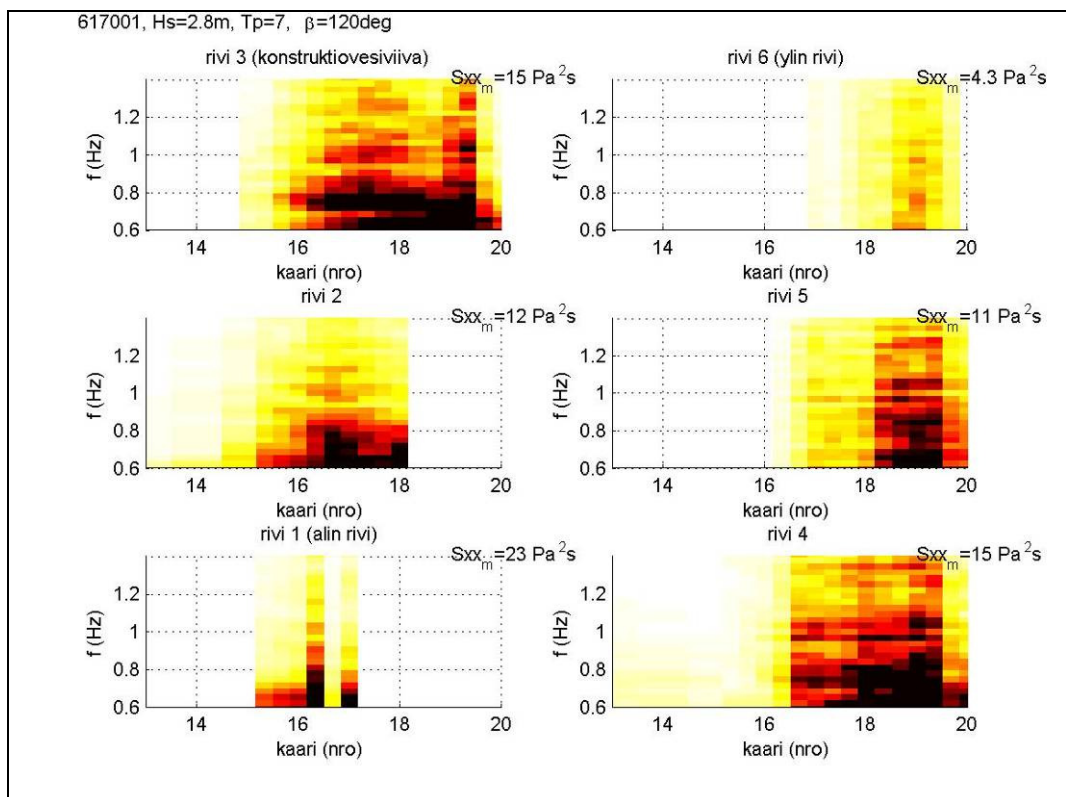
Kuva B.27. $H_s=2.0 \text{ m}$, $\beta=120 \text{ deg}$. Kohdattu aaltospektri (ylempi kuva). Pystysuuntaisen viivakuorman taajuussisältö (alempi kuva).



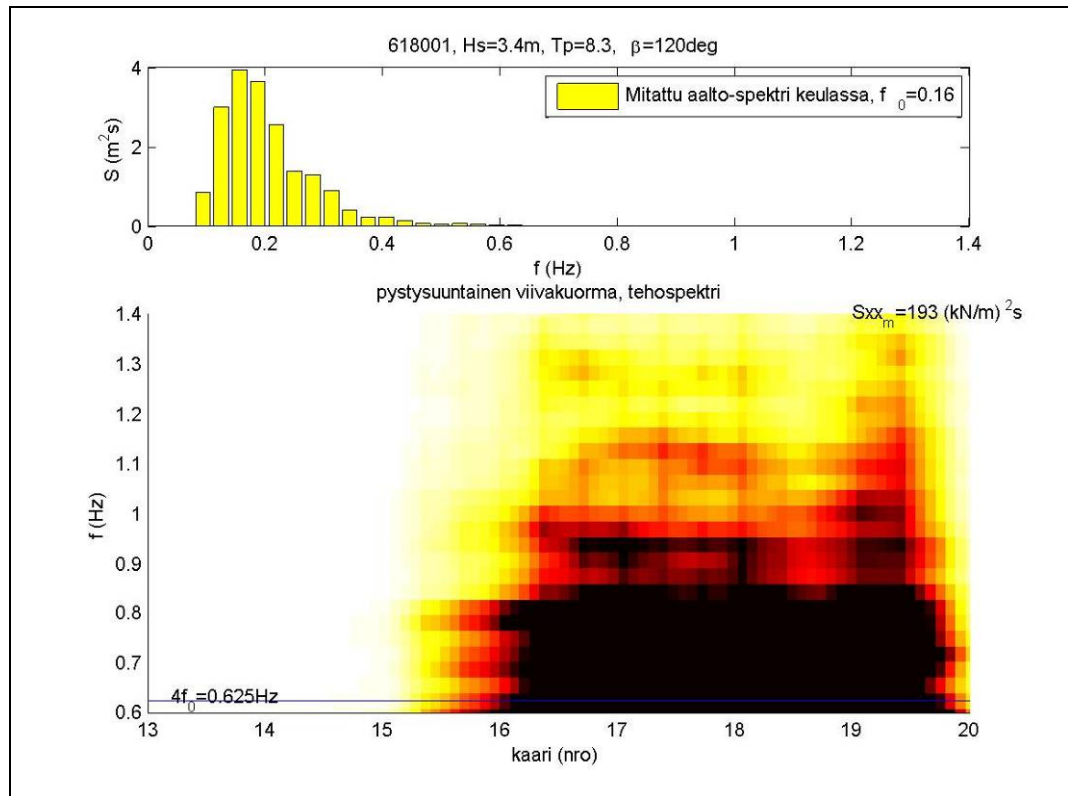
Kuva B.28. $H_s=2.0 \text{ m}$, $\beta=120 \text{ deg}$. Paineantureiden taajuussisältö riveittäin



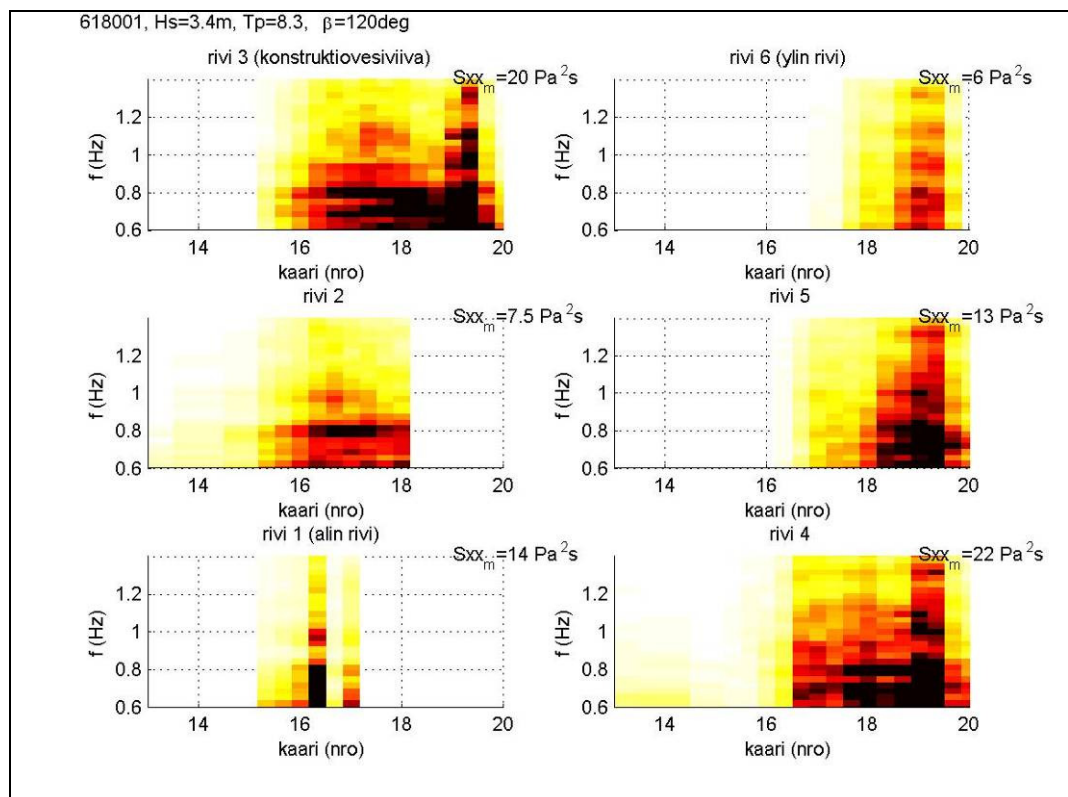
Kuva B.29. $H_s=2.8 \text{ m}$, $\beta=120 \text{ deg}$. Kohdattu aaltospektri (ylempi kuva). Pystysuuntaisen viivakuorman taajuussisältö (alempi kuva).



Kuva B.30. $H_s=2.8 \text{ m}$, $\beta=120 \text{ deg}$. Paineantureiden taajuussisältö riveittäin

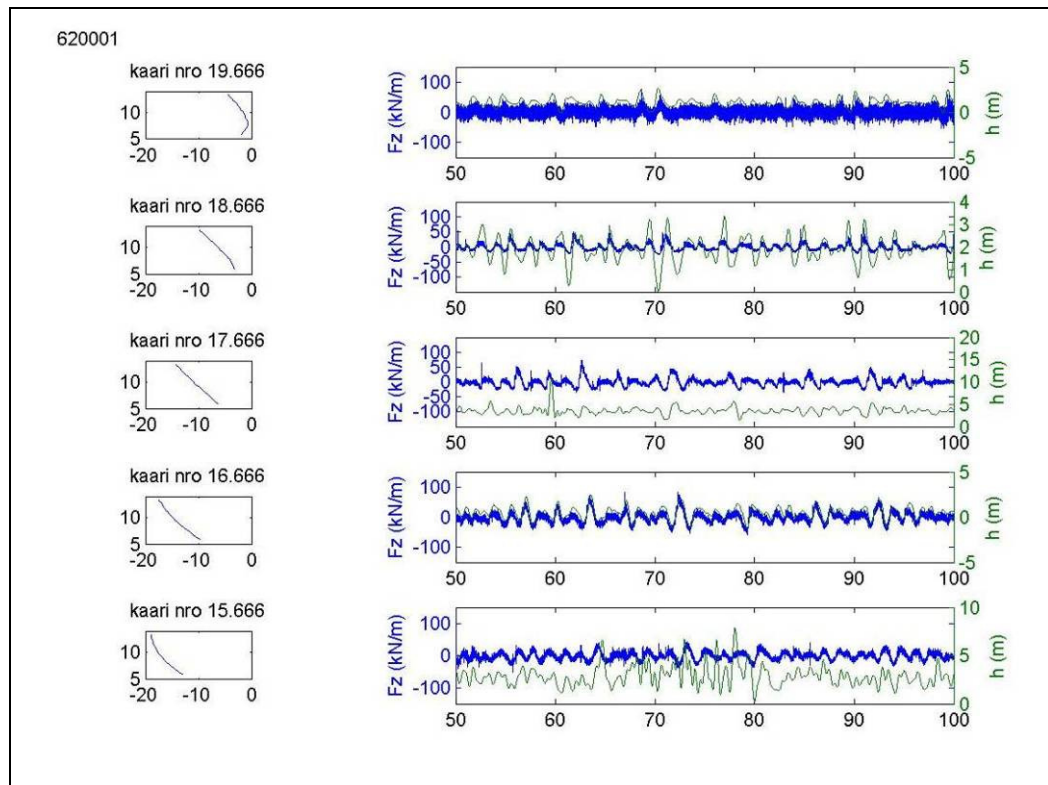


Kuva B.31. $H_s=3.4\text{ m}$, $\beta=120\text{ deg}$. Kohdattu aaltospektri (ylempi kuva). Pystysuuntaisen viivakuorman taajuussisältö (alempi kuva).

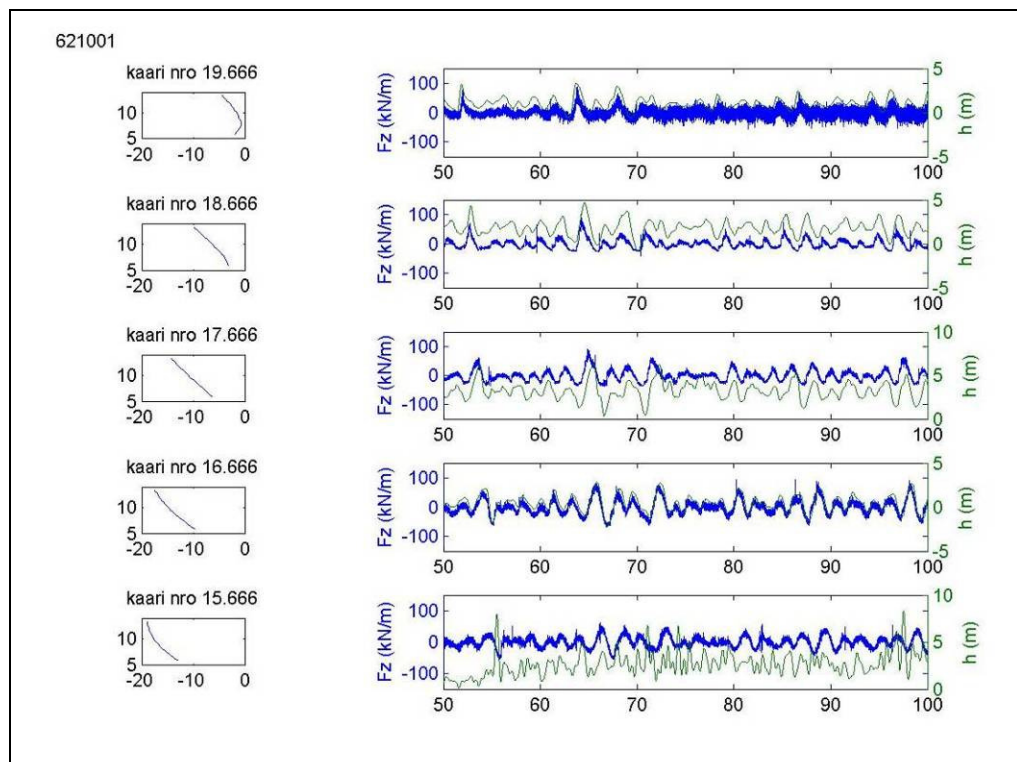


Kuva B.32. $H_s=3.4\text{ m}$, $\beta=120\text{ deg}$. Paineantureiden taajuussisältö riveittäin

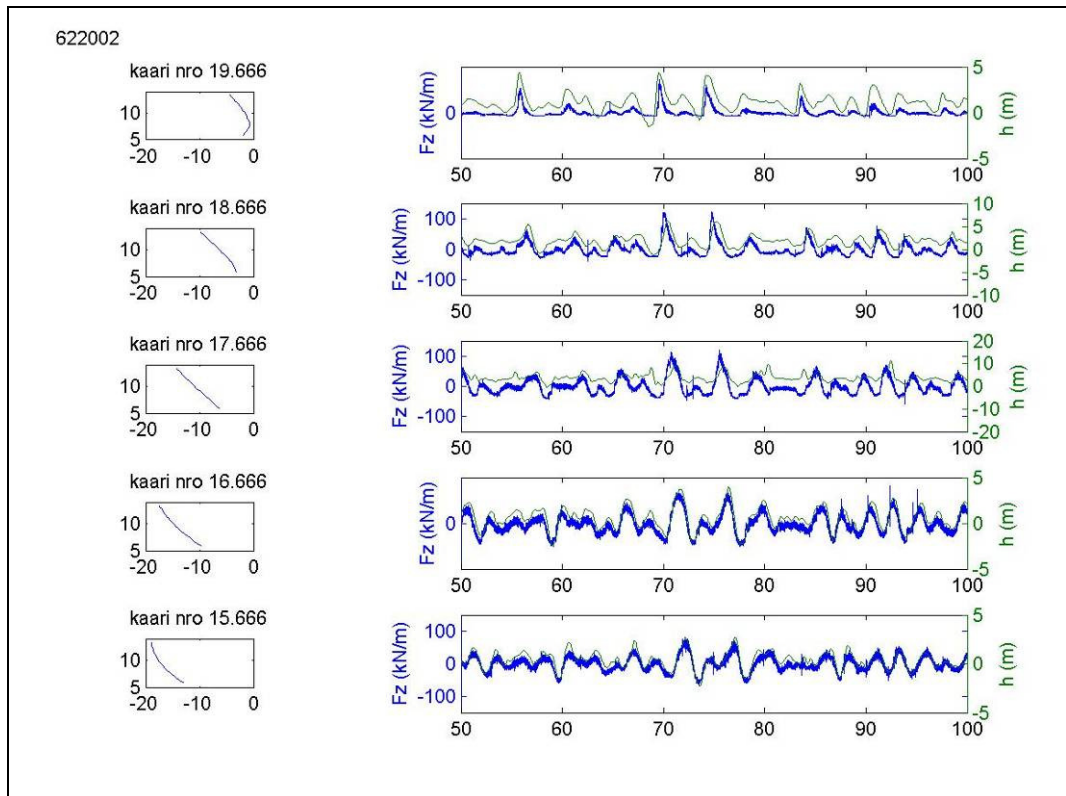
Liite C Pystysuuntainen kuorma kaarilla.



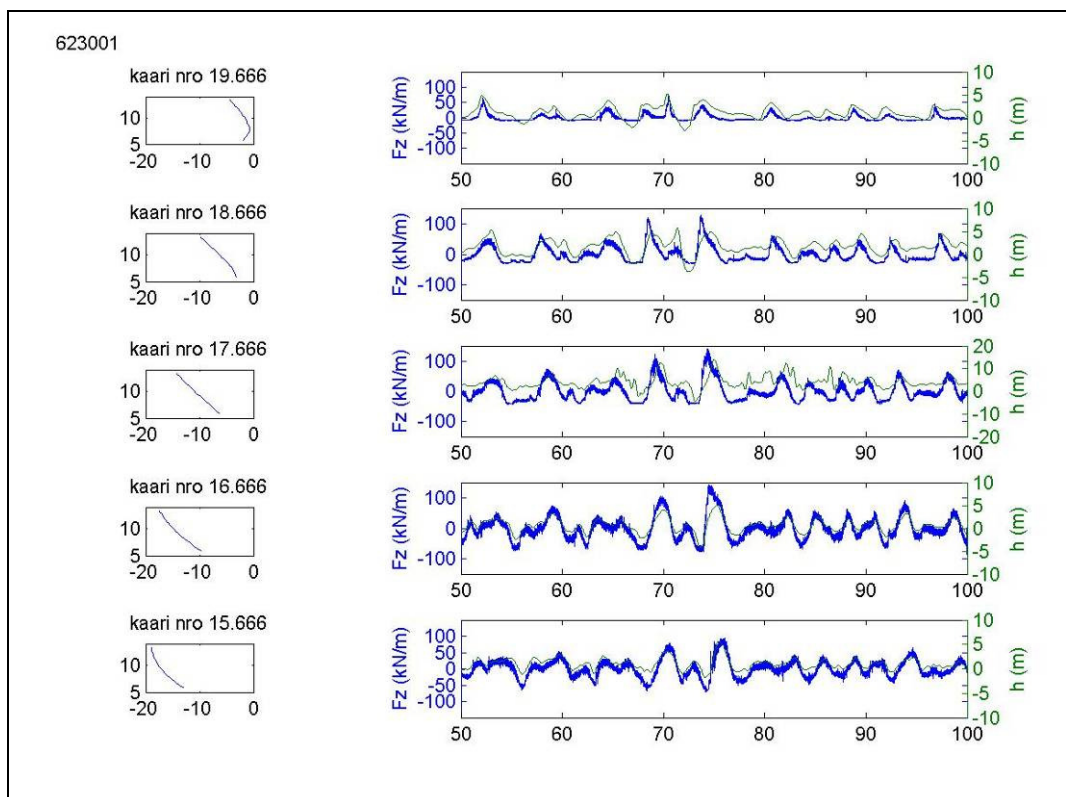
Kuva C.1. $H_s=1.4$ m, $\beta=180$ deg.



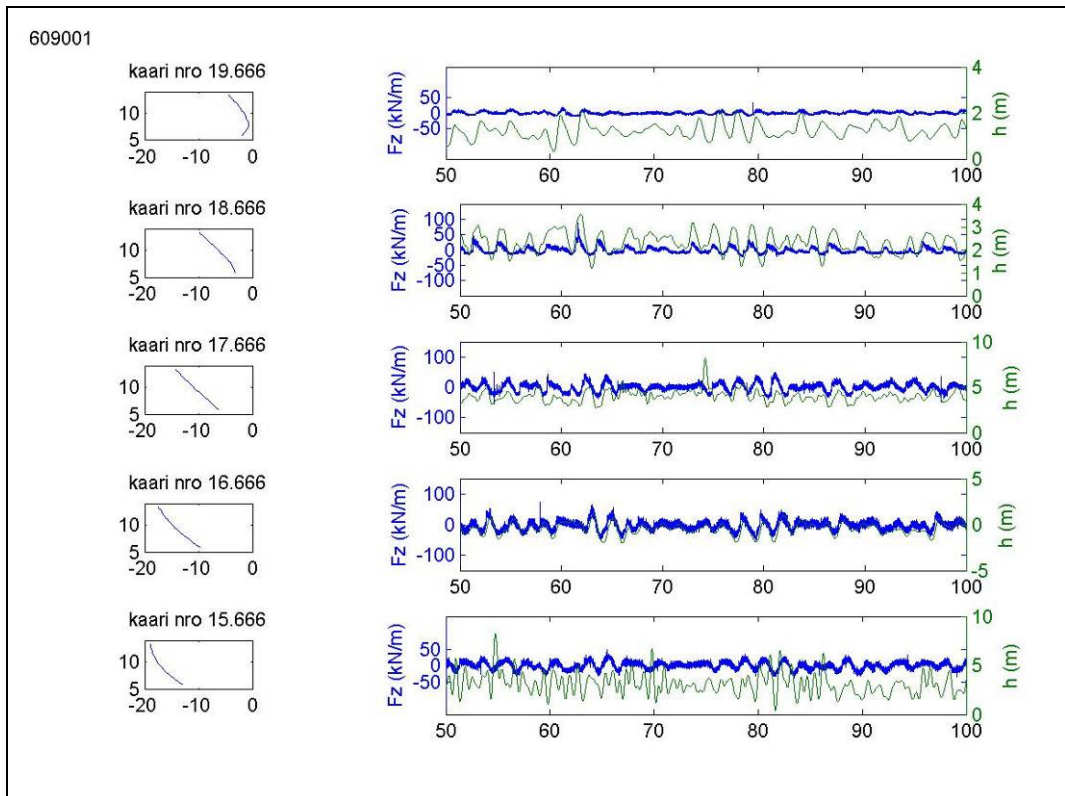
Kuva C.2. $H_s=2.0$ m, $\beta=180$ deg. Pystysuuntainen kuorma kaarilla.



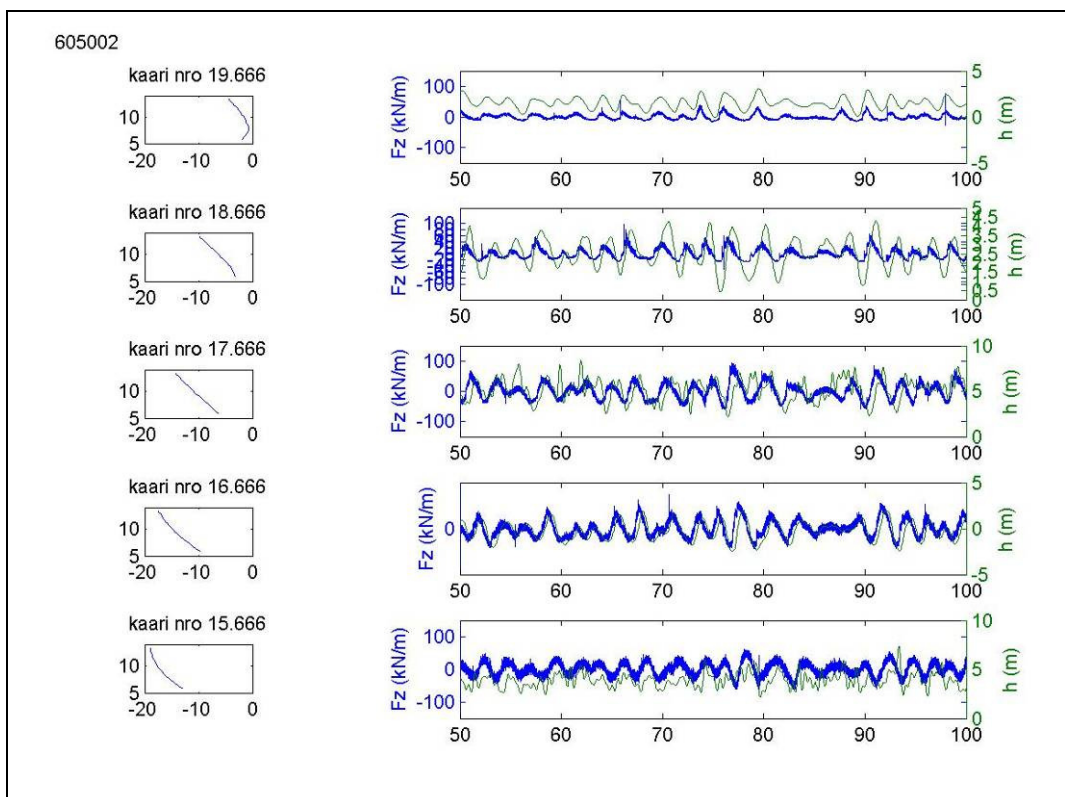
Kuva C.3. $H_s=2.8$ m, $\beta=180\text{deg}$. Pystysuuntainen kuorma kaarilla.



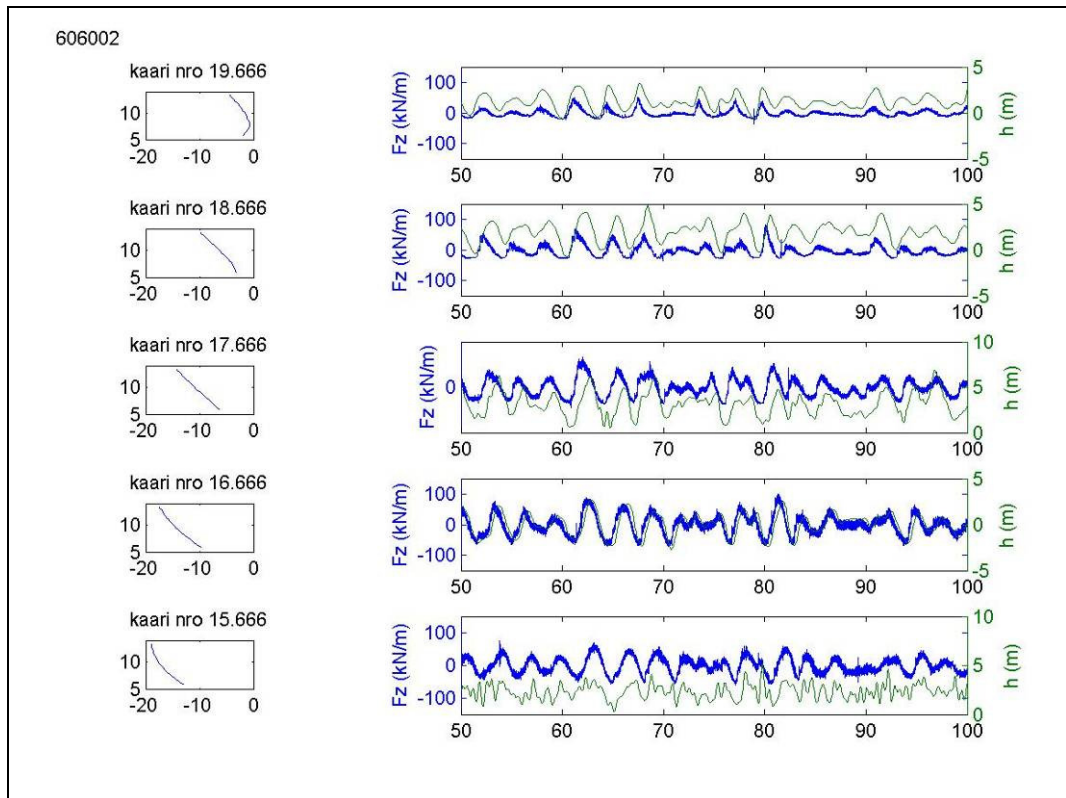
Kuva C.4. $H_s=3.4$ m, $\beta=180\text{deg}$. Pystysuuntainen kuorma kaarilla.



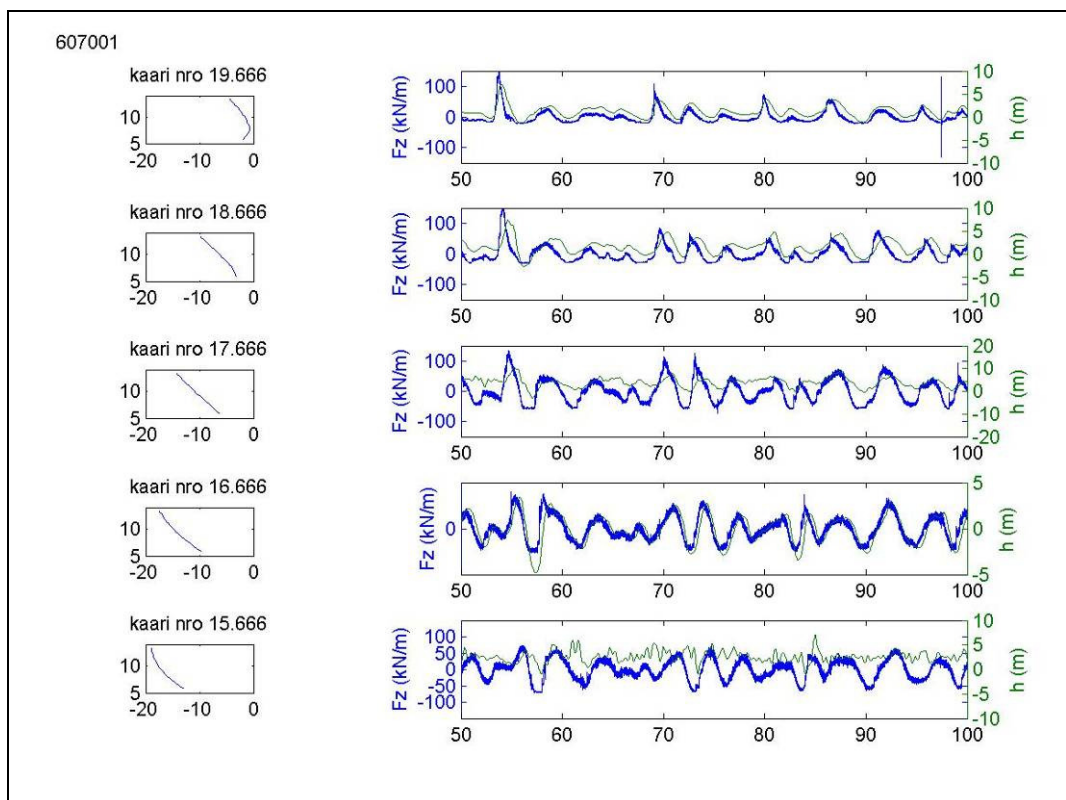
Kuva C.5. $H_s=1.4$ m, $\beta=160$ deg. Pystysuuntainen kuorma kaarilla.



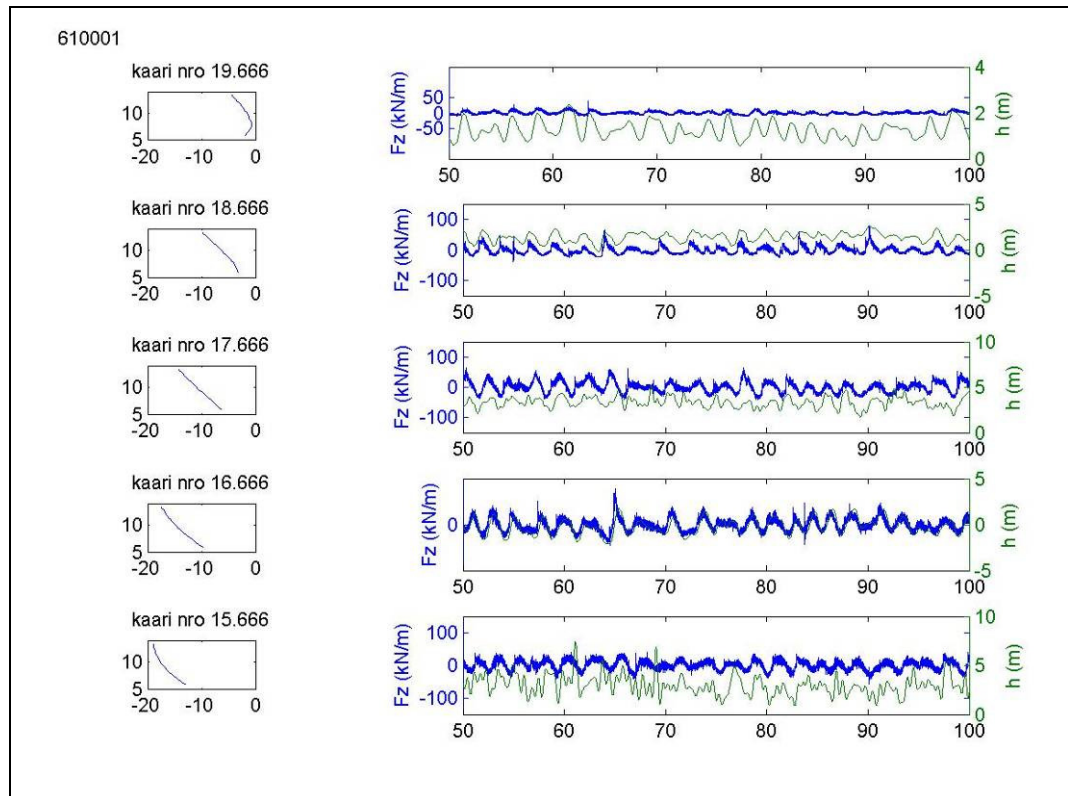
Kuva C.6. $H_s=2.0$ m, $\beta=160$ deg. Pystysuuntainen kuorma kaarilla.



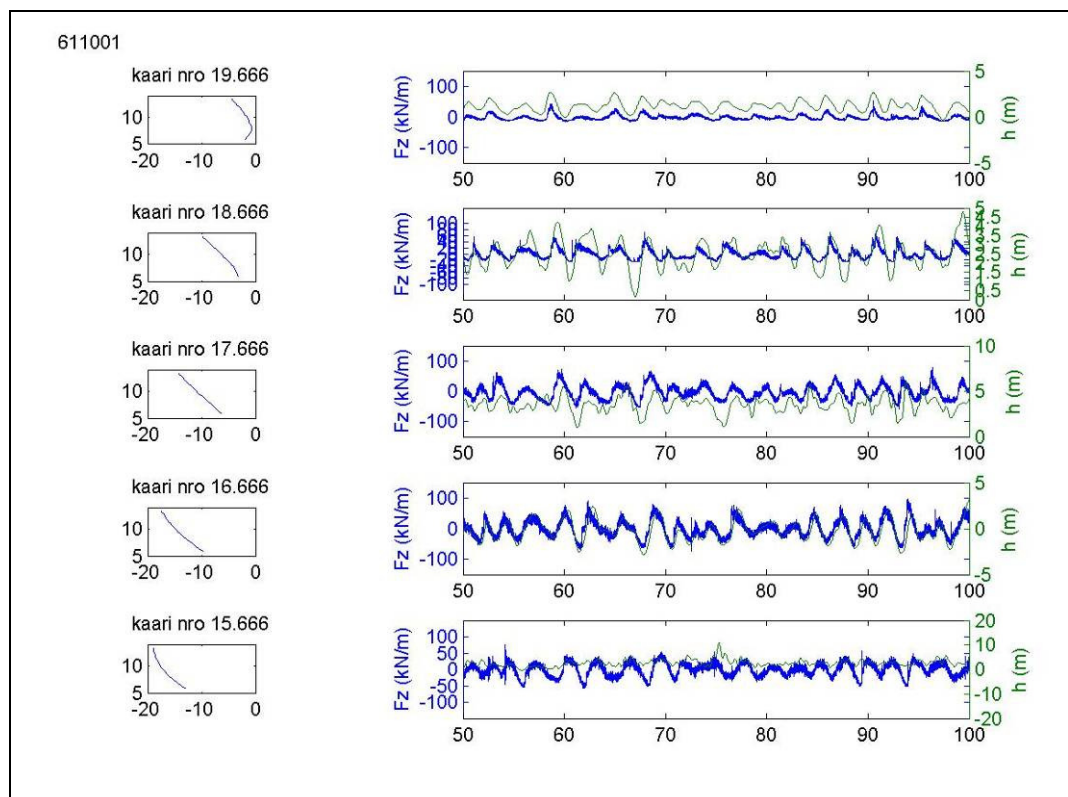
Kuva C.7. $H_s=2.8$ m, $\beta=160$ deg. Pystysuuntainen kuorma kaarilla.



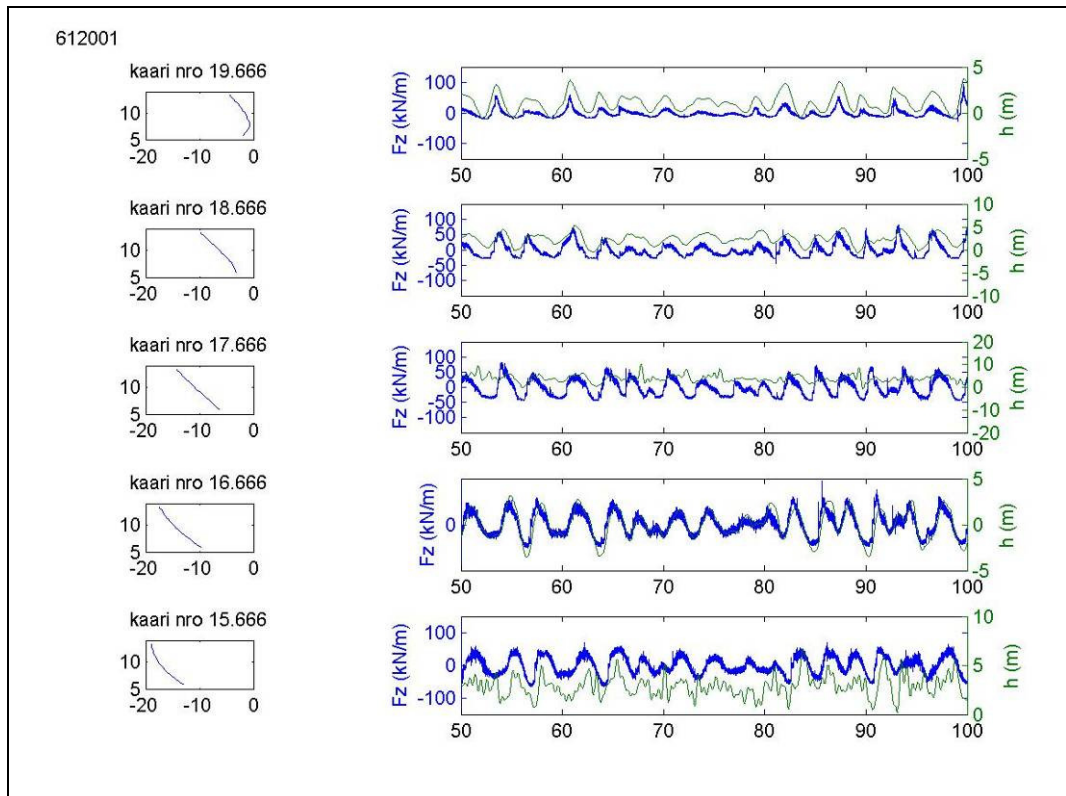
Kuva C.8. $H_s=3.4$ m, $\beta=160$ deg. Pystysuuntainen kuorma kaarilla.



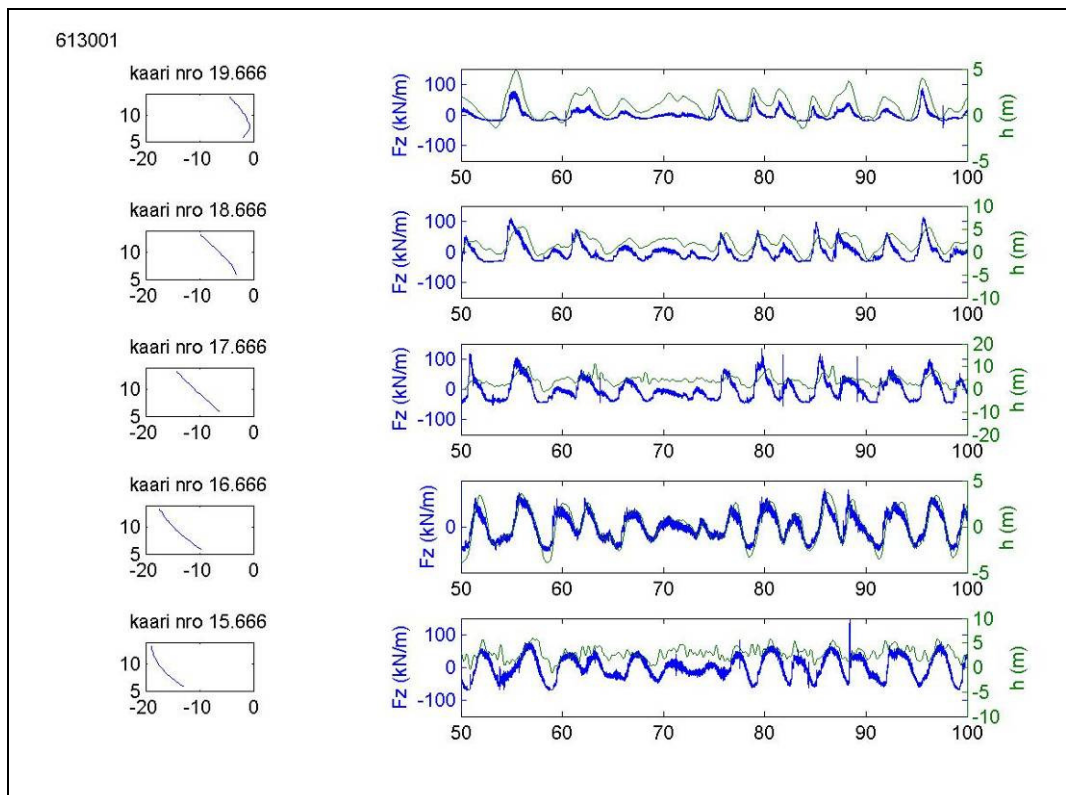
Kuva C.9. $H_s=1.4$ m, $\beta=140$ deg. Pystysuuntainen kuorma kaarilla.



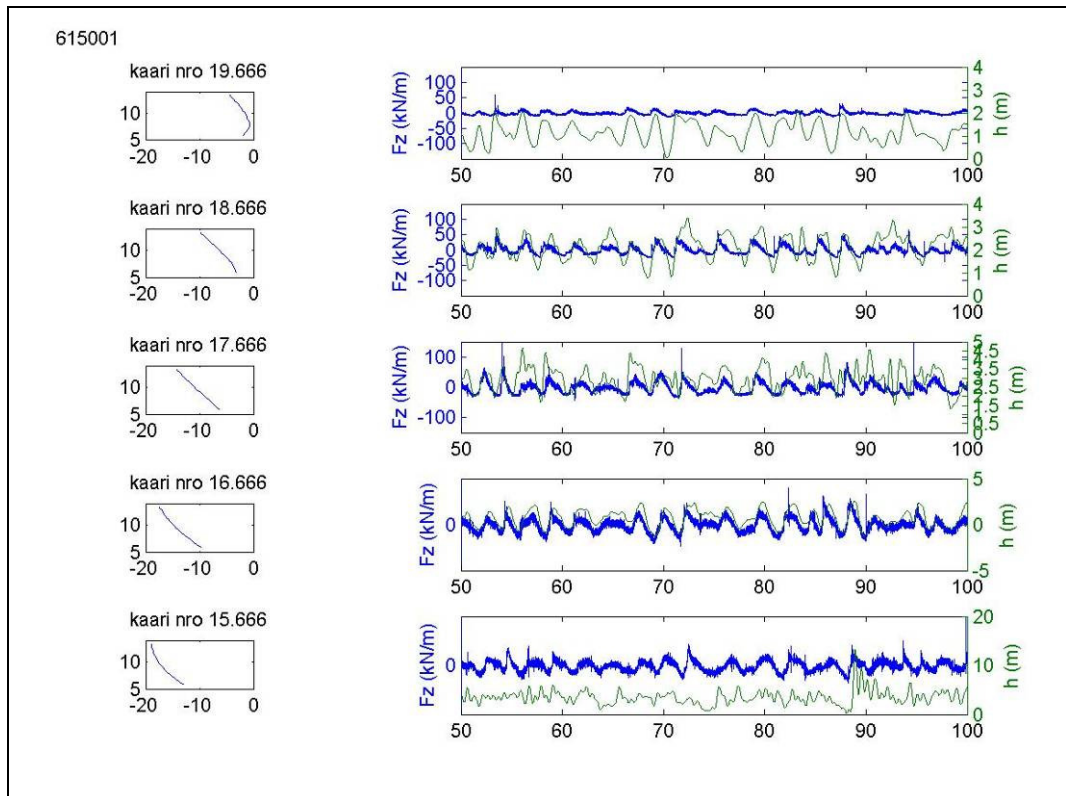
Kuva C.10. $H_s=2.0$ m, $\beta=140$ deg. Pystysuuntainen kuorma kaarilla.



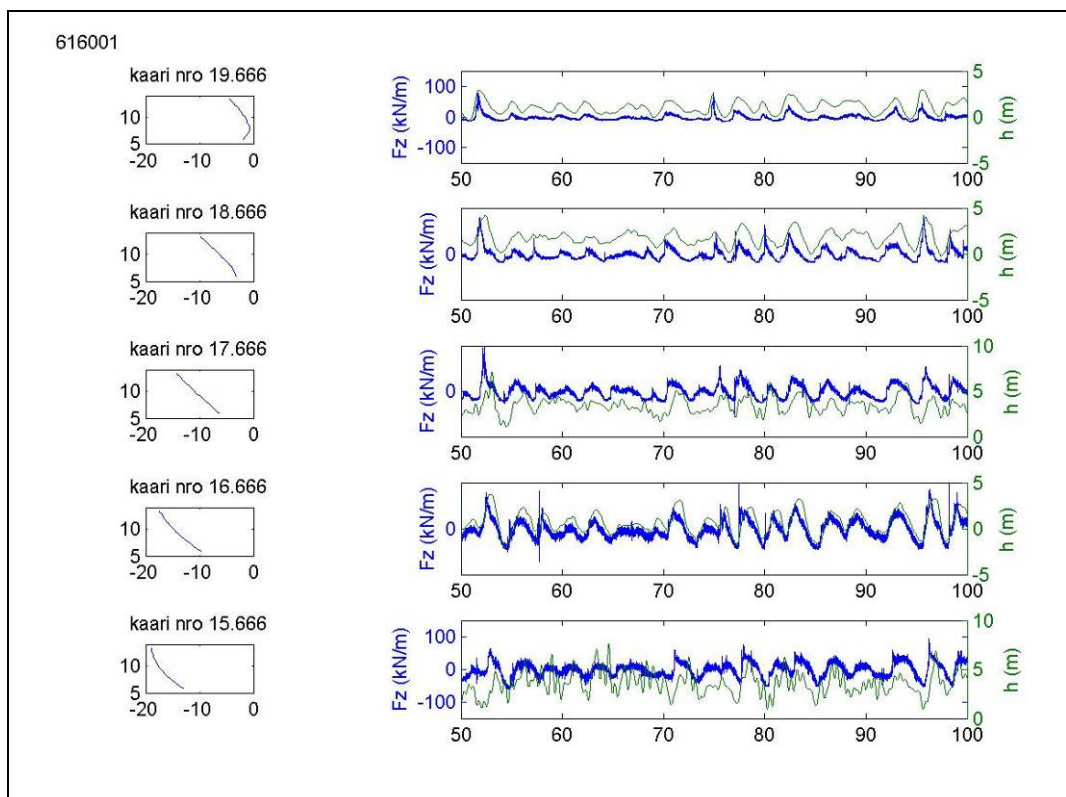
Kuva C.11. $H_s=2.8$ m, $\beta=140$ deg. Pystysuuntainen kuorma kaarilla.



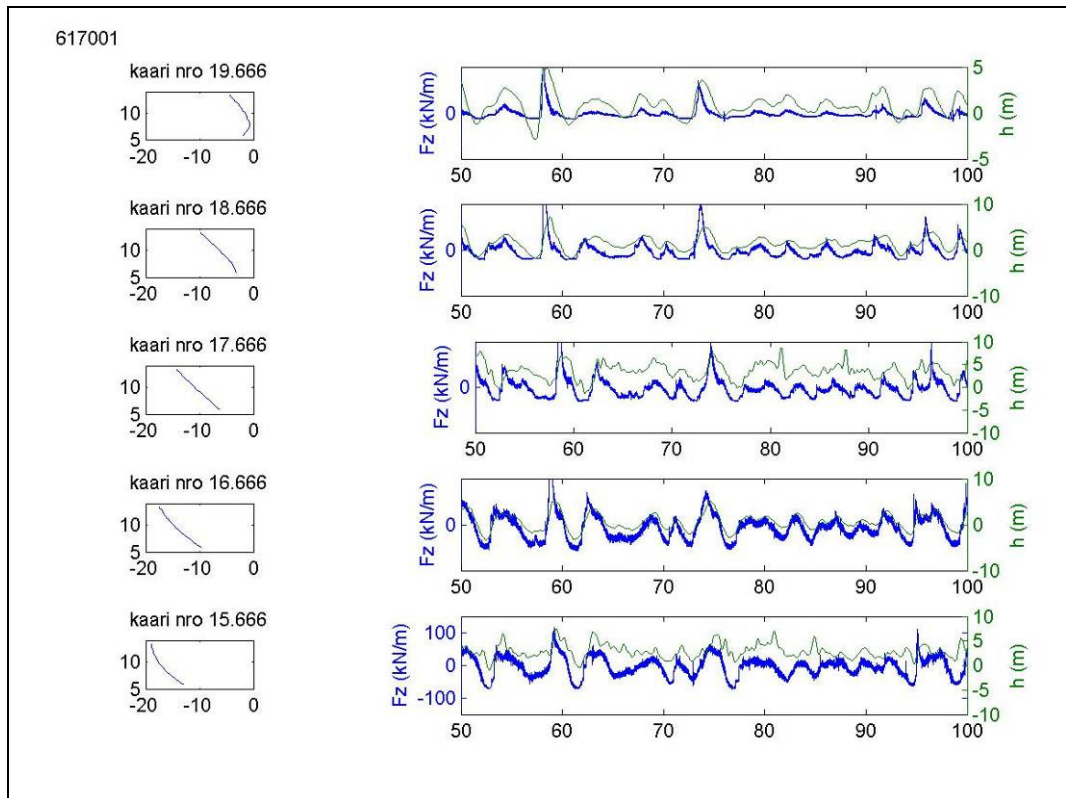
Kuva C.12. $H_s=3.4$ m, $\beta=140$ deg. Pystysuuntainen kuorma kaarilla.



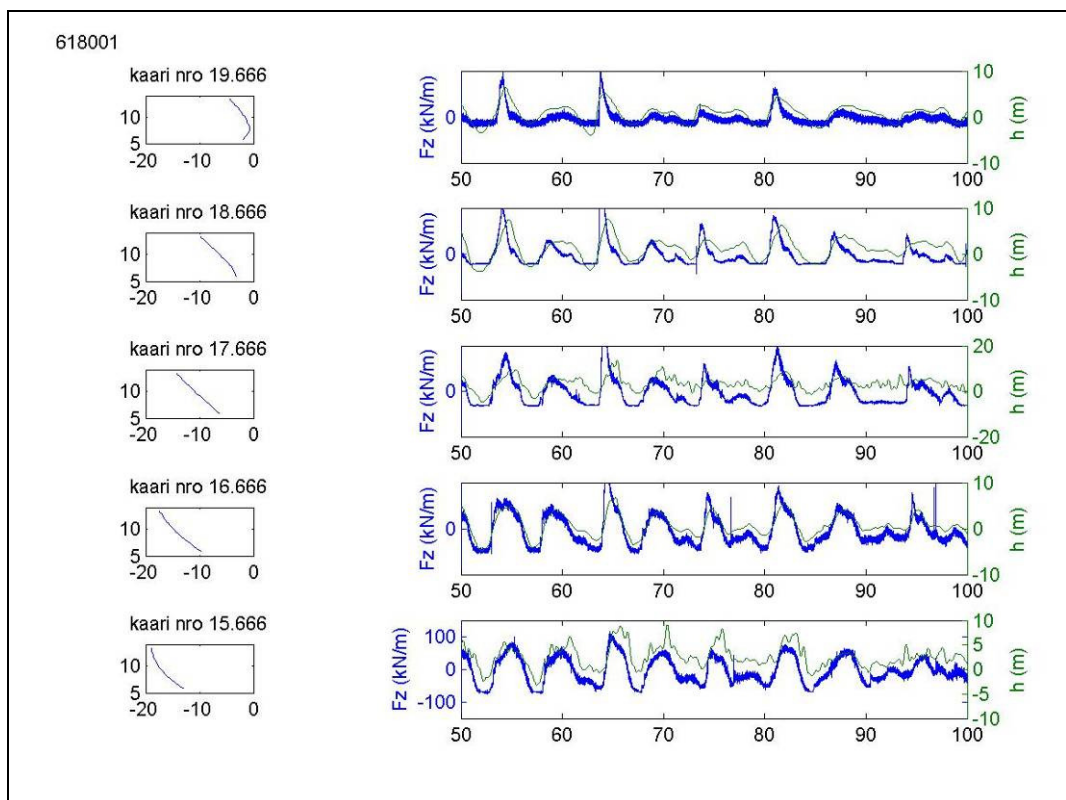
Kuva C.13. $H_s=1.4$ m, $\beta=120$ deg. Pystysuuntainen kuorma kaarilla.



Kuva C.14. $H_s=2.0$ m, $\beta=120$ deg. Pystysuuntainen kuorma kaarilla.

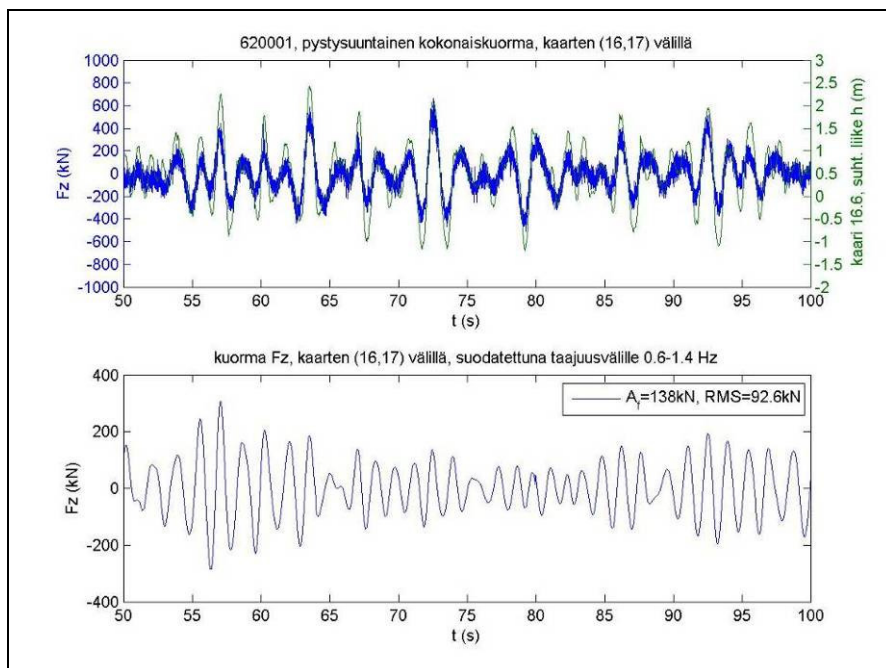


Kuva C.15. $H_s=2.8$ m, $\beta=120$ deg. Pystysuuntainen kuorma kaarilla.

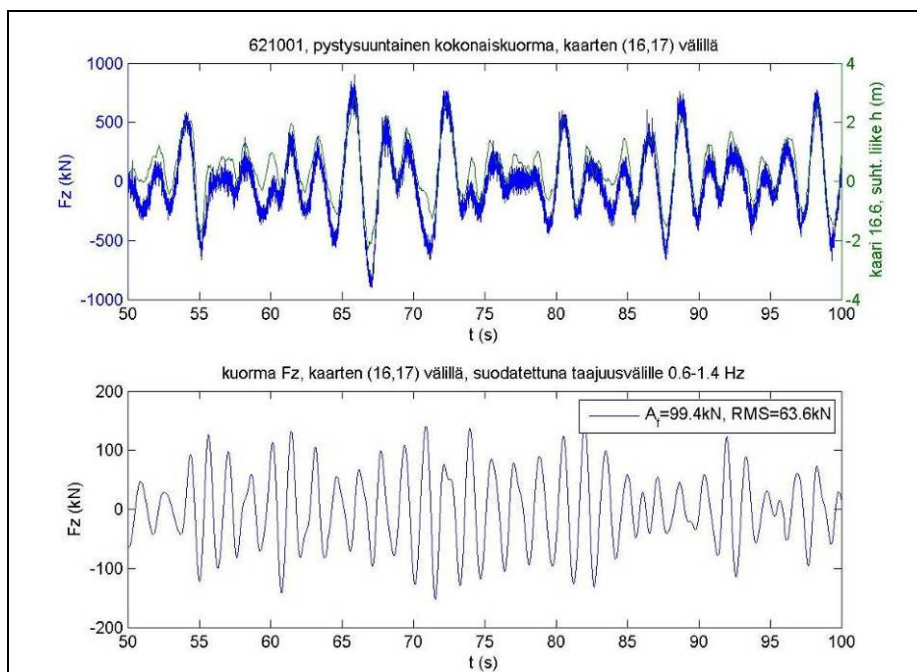


Kuva C.16. $H_s=3.4$ m, $\beta=120$ deg. Pystysuuntainen kuorma kaarilla.

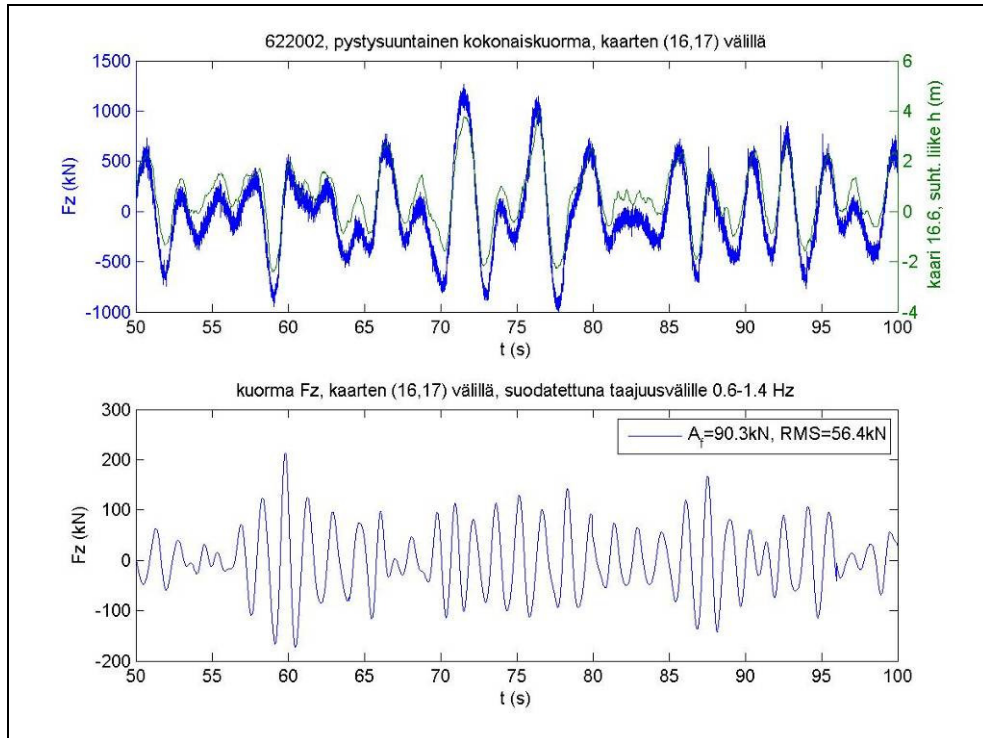
Liite D Pystysuuntainen kokonaiskuorma



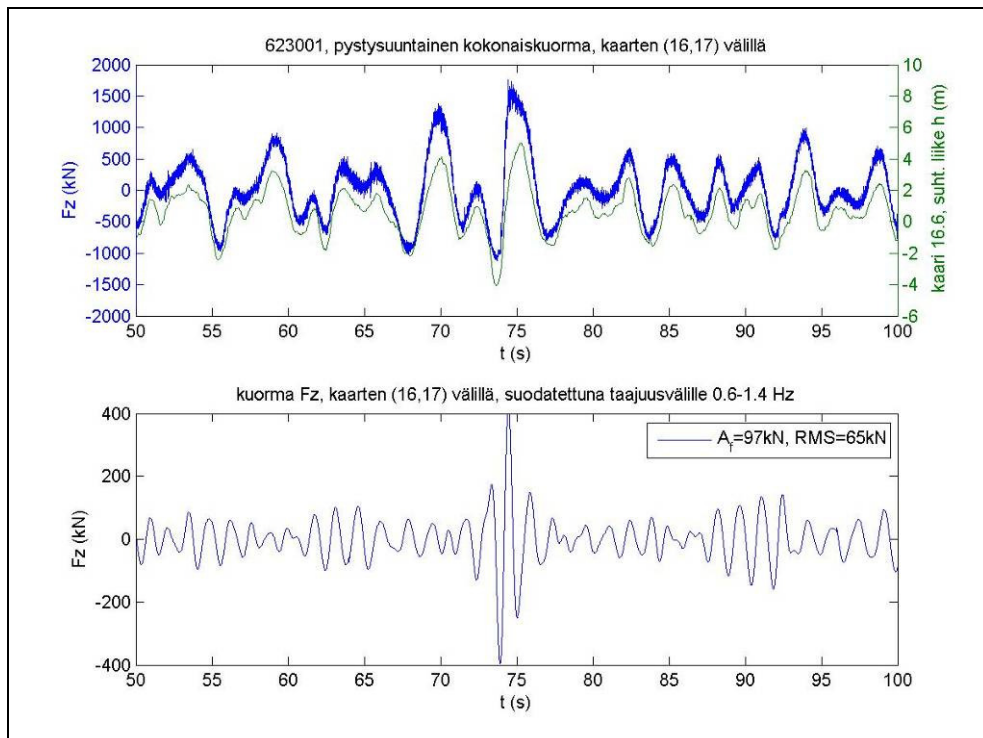
Kuva D.1. $H_s = 1.4 \text{ m}$, $\beta = 180 \text{ deg}$. Ylempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma sininen kuvaaja, suhteellinen liike kaarella 16.6, vihreä kuvaaja. Alempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma suodatettuna.



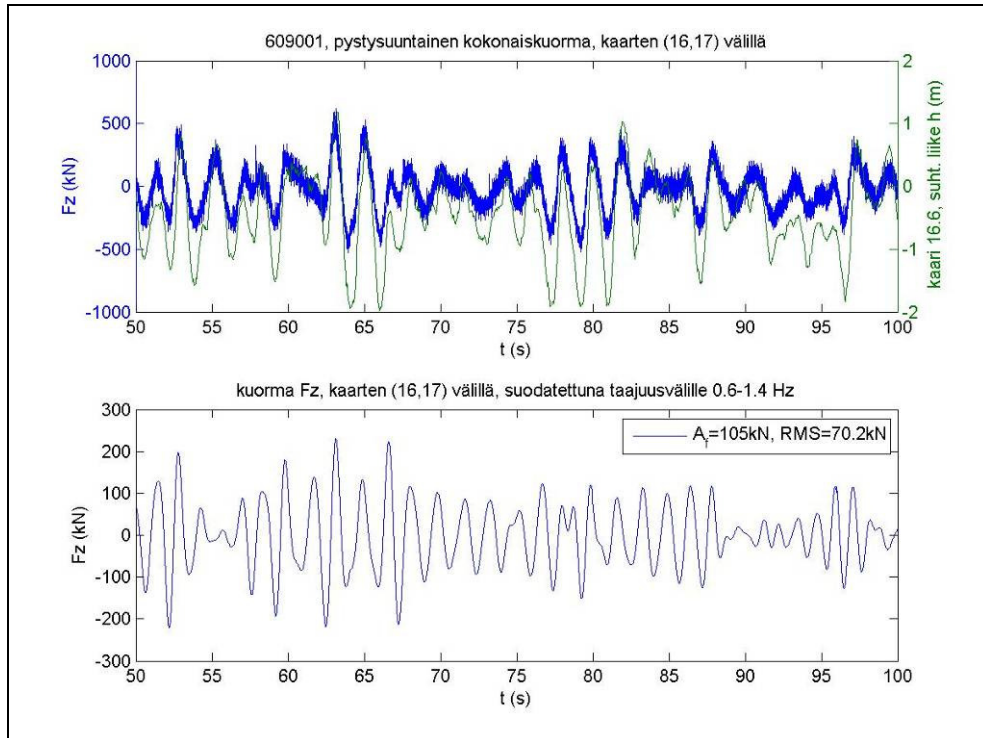
Kuva D.2. $H_s = 2.0 \text{ m}$, $\beta = 180 \text{ deg}$. Ylempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma sininen kuvaaja, suhteellinen liike kaarella 16.6, vihreä kuvaaja. Alempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma suodatettuna.



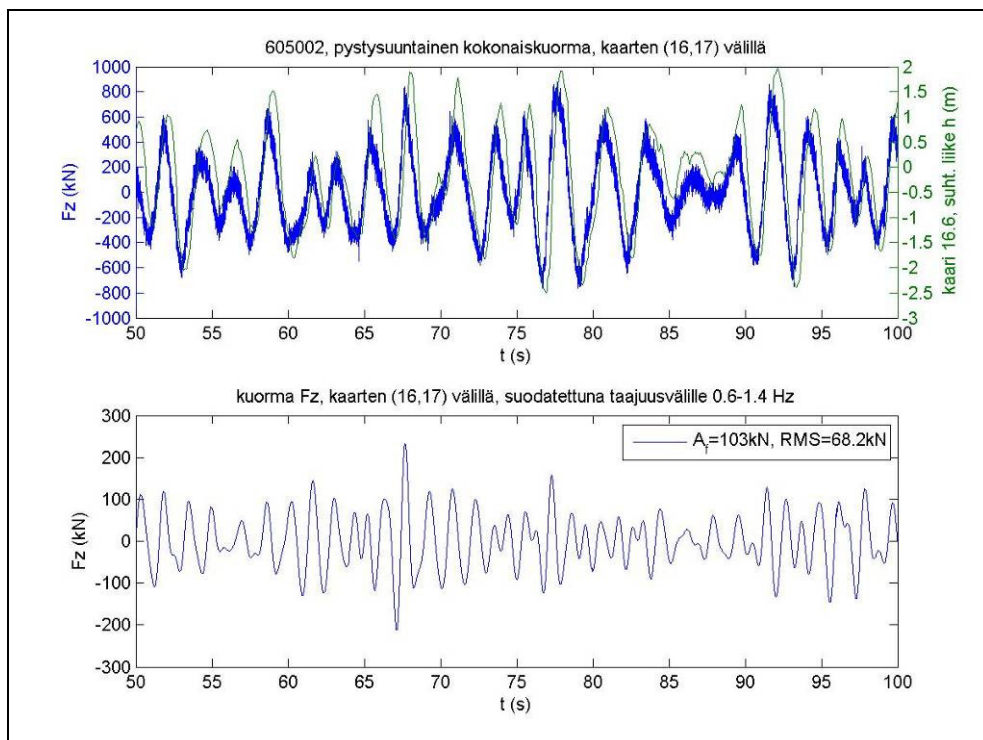
Kuva D.3. $H_s = 2.8 \text{ m}$, $\beta = 180^\circ$. Ylempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma sininen kuvaaja, suhteellinen liike kaarella 16.6, vihreä kuvaaja. Alempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma suodatettuna.



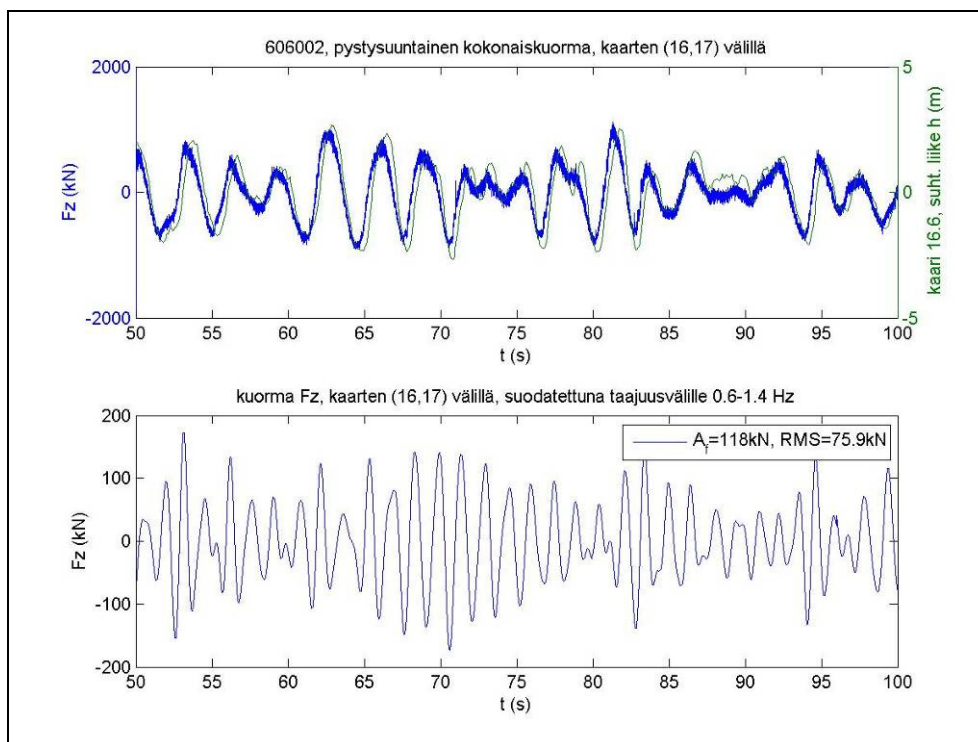
Kuva D.4. $H_s = 3.4 \text{ m}$, $\beta = 180^\circ$. Ylempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma sininen kuvaaja, suhteellinen liike kaarella 16.6, vihreä kuvaaja. Alempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma suodatettuna.



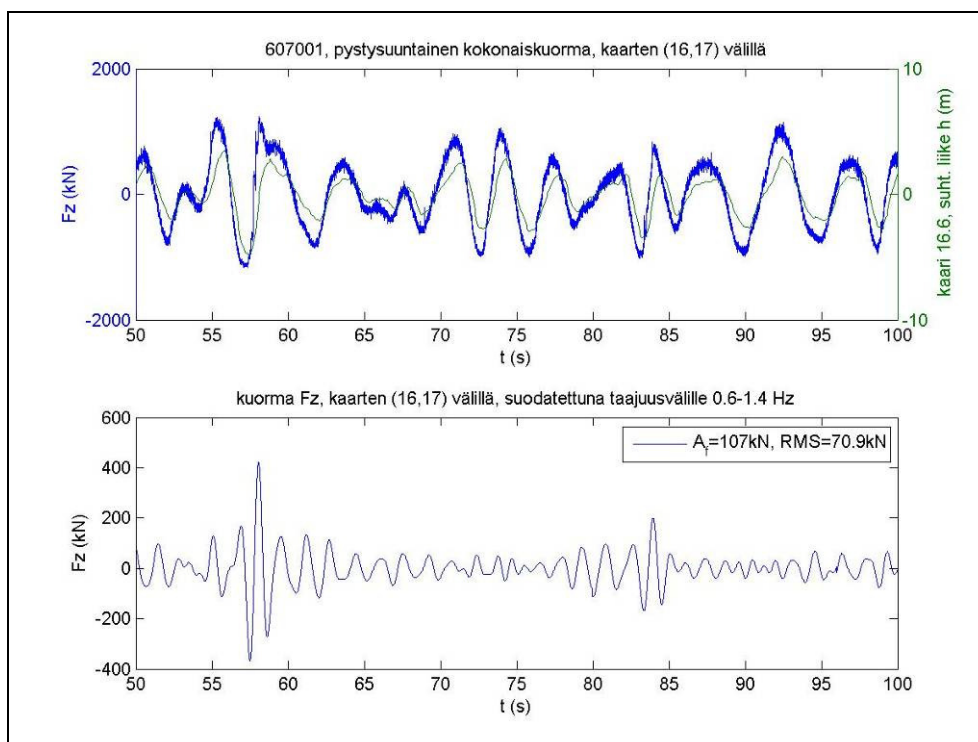
Kuva D.5. $H_s=1.4$ m, $\beta=160$ deg. Ylempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma sininen kuvaaja, suhteellinen liike kaarella 16.6, vihreä kuvaaja. Alempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma suodatettuna.



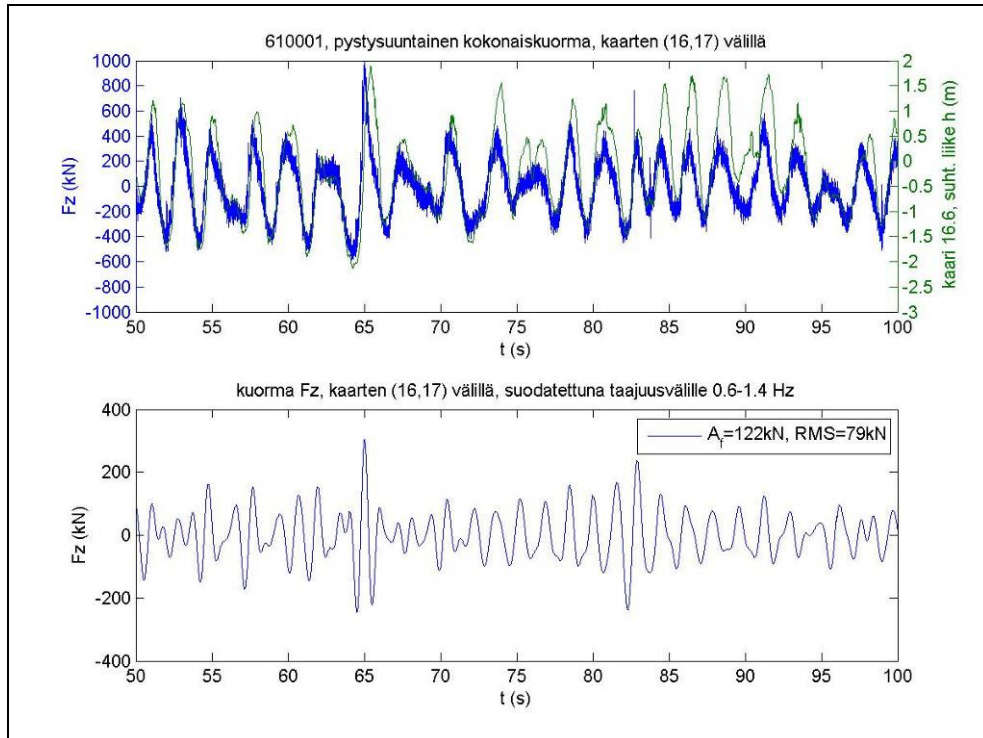
Kuva D.6. $H_s=2.0$ m, $\beta=160$ deg. Ylempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma sininen kuvaaja, suhteellinen liike kaarella 16.6, vihreä kuvaaja. Alempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma suodatettuna.



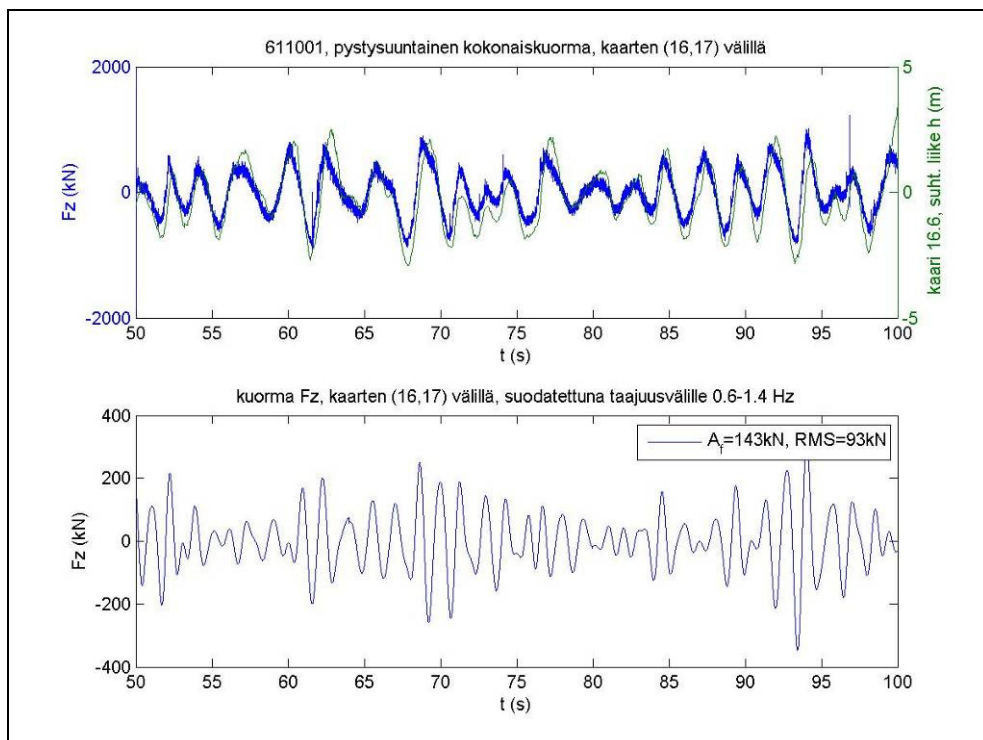
Kuva D.7. $H_s=2.8$ m, $\beta=160$ deg. Ylempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma sininen kuvaaja, suhteellinen liike kaarella 16.6, vihreä kuvaaja. Alempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma suodatettuna.



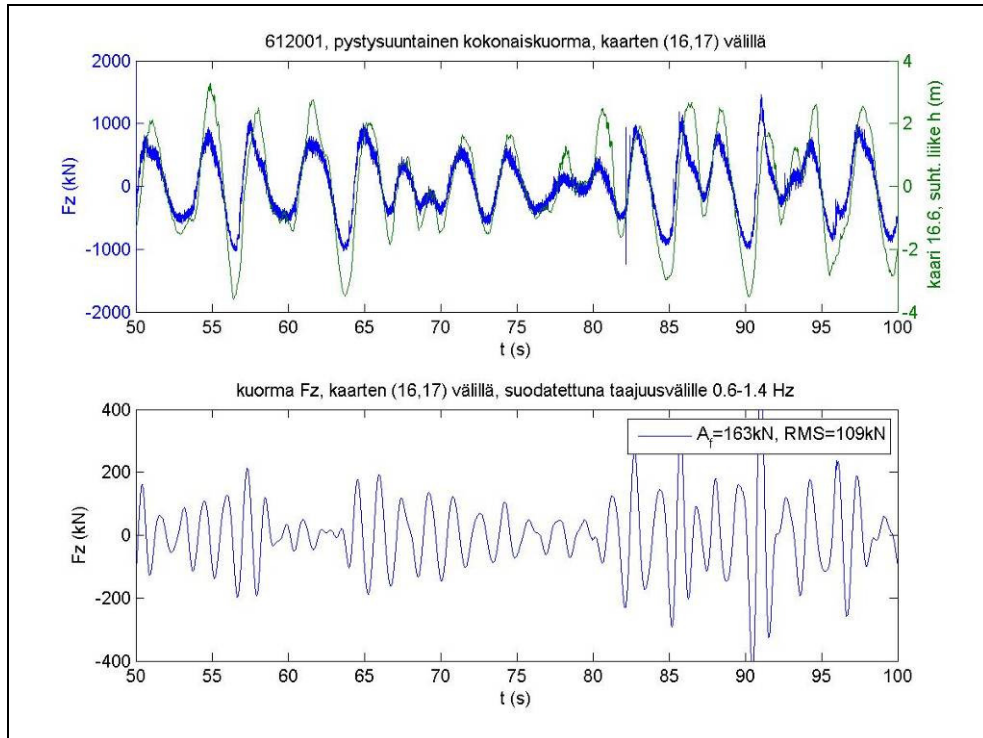
Kuva D.8. $H_s=3.4$ m, $\beta=160$ deg. Ylempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma sininen kuvaaja, suhteellinen liike kaarella 16.6, vihreä kuvaaja. Alempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma suodatettuna.



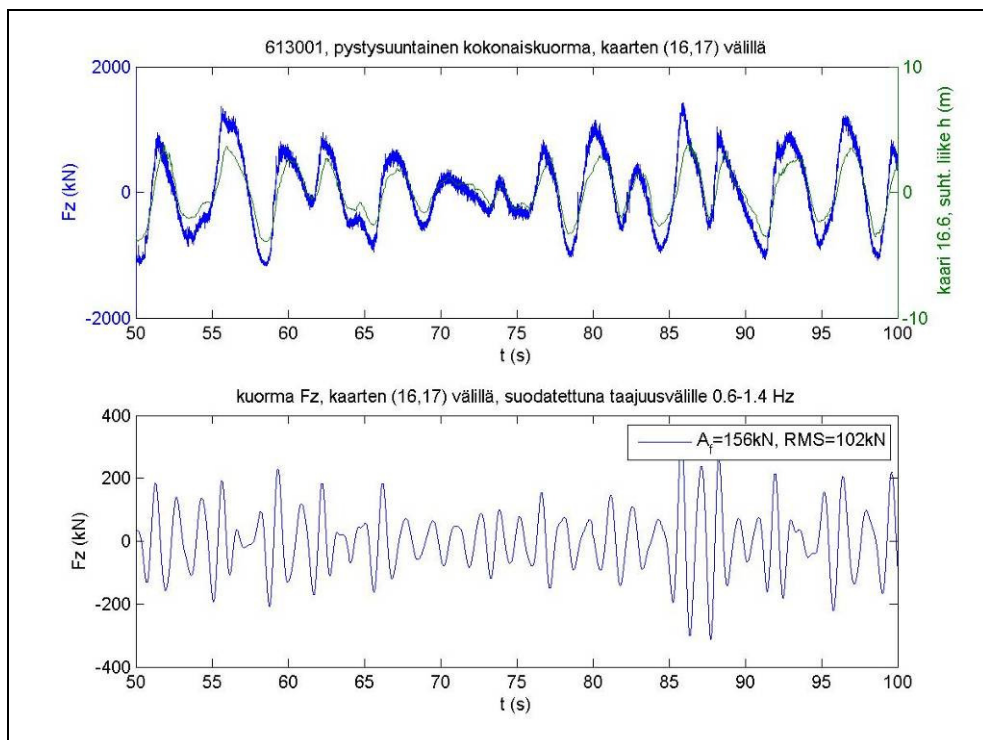
Kuva D.9. $H_s=1.4$ m, $\beta=140$ deg. Ylempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma sininen kuvaaja, suhteellinen liike kaarella 16.6, vihreä kuvaaja. Alempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma suodatettuna.



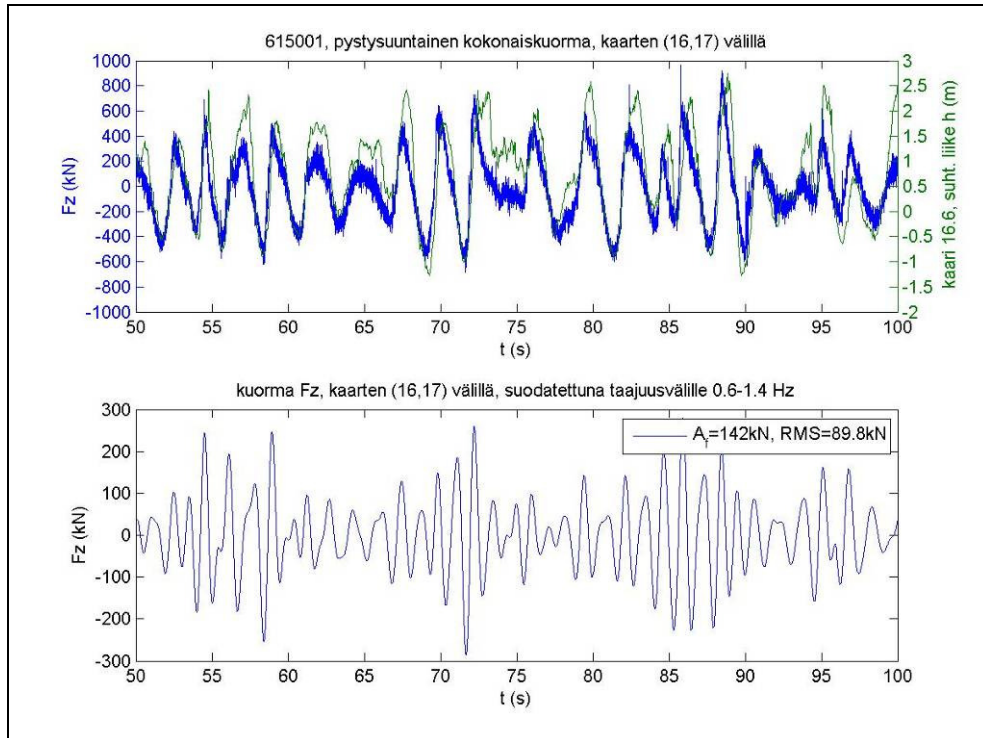
Kuva D.10. $H_s=2.0$ m, $\beta=140$ deg. Ylempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma sininen kuvaaja, suhteellinen liike kaarella 16.6, vihreä kuvaaja. Alempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma suodatettuna.



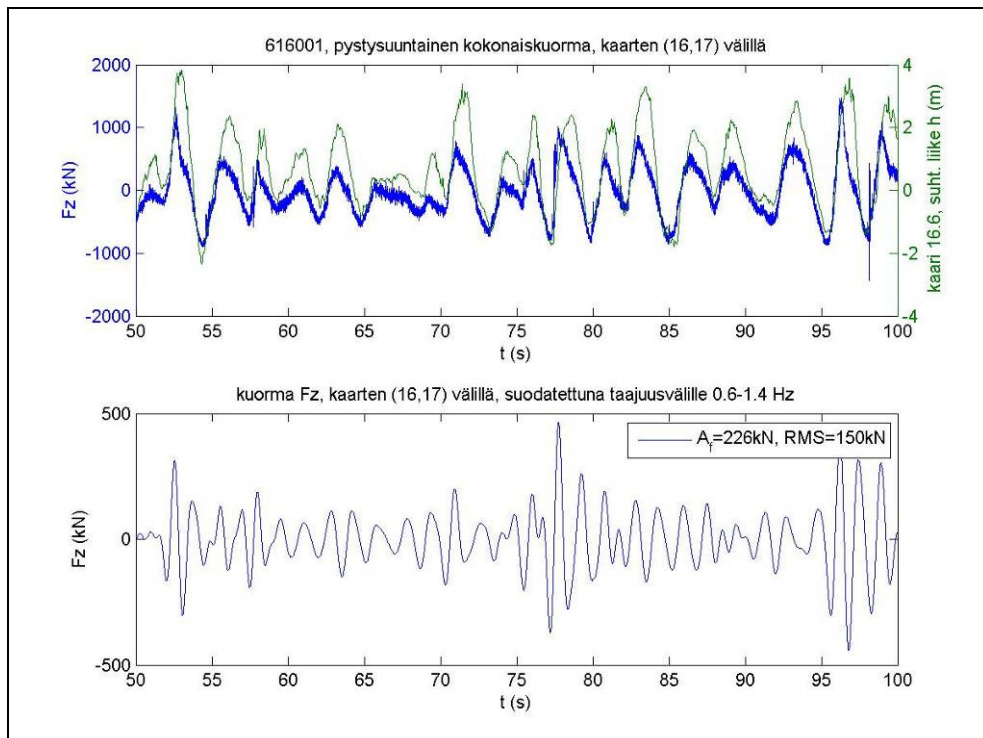
Kuva D.11. $H_s=2.8$ m, $\beta=140$ deg. Ylempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma sininen kuvaaja, suhteellinen liike kaarella 16.6, vihreä kuvaaja. Alempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma suodatettuna.



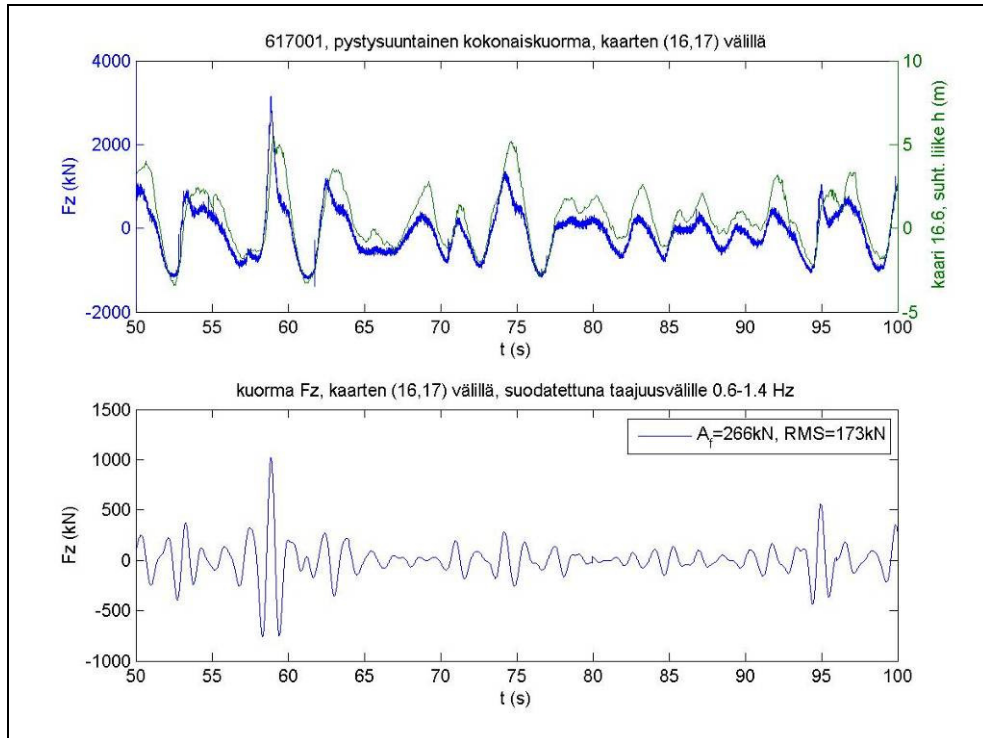
Kuva D.12. $H_s=3.4$ m, $\beta=140$ deg. Ylempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma sininen kuvaaja, suhteellinen liike kaarella 16.6, vihreä kuvaaja. Alempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma suodatettuna.



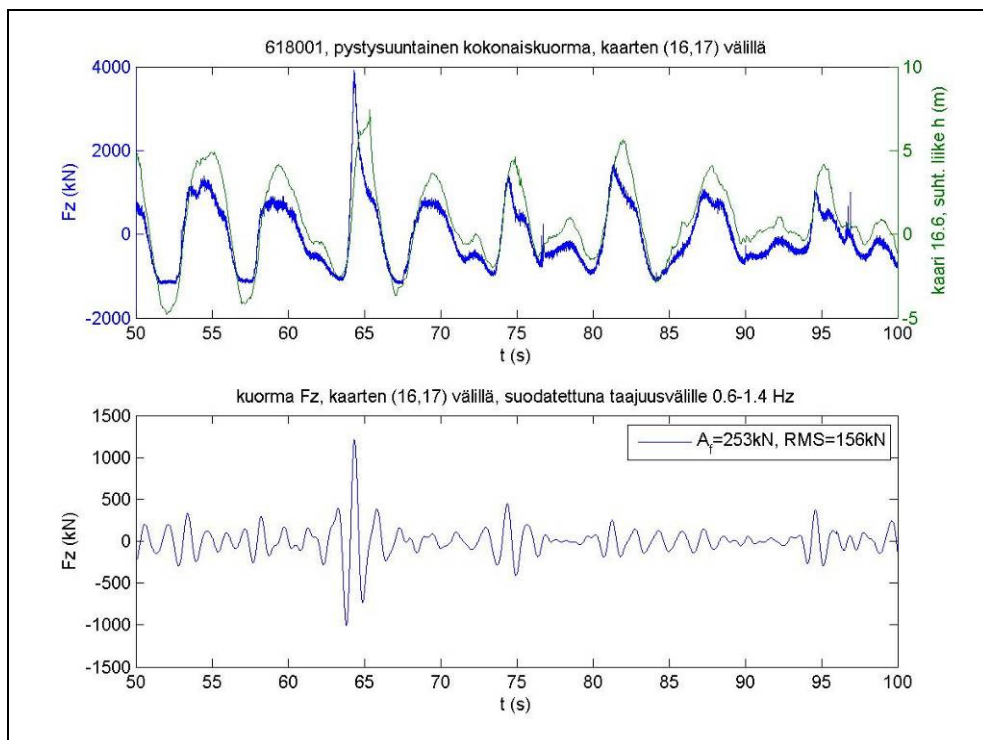
Kuva D.13. $H_s=1.4 \text{ m}$, $\beta=120 \text{ deg}$. Ylempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma sininen kuvaaja, suhteellinen liike kaarella 16.6, vihreä kuvaaja. Alempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma suodatettuna.



Kuva D.14. $H_s=2.0 \text{ m}$, $\beta=120 \text{ deg}$. Ylempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma sininen kuvaaja, suhteellinen liike kaarella 16.6, vihreä kuvaaja. Alempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma suodatettuna.



Kuva D.15. $H_s=2.8\text{ m}$, $\beta=120\text{ deg}$. Ylempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma sininen kuvaaja, suhteellinen liike kaarella 16.6, vihreä kuvaaja. Alempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma suodatettuna.



Kuva D.16. $H_s=3.4\text{ m}$, $\beta=120\text{ deg}$. Ylempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma sininen kuvaaja, suhteellinen liike kaarella 16.6, vihreä kuvaaja. Alempi kuva: pystysuuntainen kokonaiskuorma suodatettuna.